

VŠB – Technická univerzita Ostrava  
Fakulta elektrotechniky a informatiky  
Katedra elektroenergetiky

## **Řešení zkratových poměrů v průmyslovém objektu**

**Solving of Short Circuit Conditions in Industrial Enterprise**

2009

Bc. Martin Mach

## PROHLÁŠENÍ:

*Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.*

V Ostravě dne 7.5.2009

.....

Podpis

## **PODĚKOVÁNÍ:**

Poděkování bych chtěl vyjádřit vedoucímu mé diplomové práce Ing. Petru Krejčímu Ph.D. za vstřícnost a trpělivost. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Marku Tinkovi za poskytnutí potřebných materiálů.

## **Abstrakt**

Tématem této diplomové práce je řešení zkratových poměrů v průmyslovém objektu. Teoretická část je zaměřena na popis zkratových jevů, metodiky výpočtu dle normy ČSN EN 60909 a krátce popsána problematika napájení průmyslového objektu. Samotná praktická část se již zabývá výpočtem maximálních a minimálních zkratových poměrů na rozvodnách VN dle zadaného průmyslového objektu a následná kontrola kabelů VN na dovolené oteplení při zkratu.

## **Klíčová slova**

Zkrat, zkratový proud, zkratový výkon, počáteční rázový zkratový proud, vypínací proud, ekvivalentní oteplovací zkratový proud, nárazový zkratový proud, zkratová impedance.

## **Abstract**

The topic of this diploma thesis is dealing with short-circuit ratio in industrial building. The theoretical part focuses on the description of short-circuit phenomena, the short-circuit calculation methods according to the ČSN EN 60909 regulation and a brief description of the problem of power supply in industrial building. The practical part deals with the calculation of the maximum and minimum short-circuit ratio at VN distribution points with regard to a given industrial buildingt and a subsequent check of VN cables for the permissible short-circuit temperature rise.

## **Key words**

Short circuit, short-circuit current, short-circuit power, initial symmetrical short-circuit current, breaking current, thermal equivalent short-circuit current, peak short-circuit current, short-circuit impedance.

## Seznam použitých symbolů a zkratk:

$A$	Počáteční hodnota stejnosměrné složky $i_{d.c.}$
$c$	Napěťový součinitel
$f$	Kmitočet
$G$	Generátor
$I_b$	Souměrný zkratový vypínací proud
$I_k$	Ustálený zkratový proud
$I''_k$	Počáteční souměrný rázový zkratový proud
$I_{LR}$	Souměrný záběrový proud asynchronního motoru
$I_{rT}$	Jmenovitý proud transformátoru
$I_{ke}$	Ekvivalentní oteplovací zkratový proud
$i_{d.c.}$	Stejnosměrná složka zkratového proudu
$i_{kS0}$	Okamžitá hodnota střídavé složky zkratového proudu
$i_p$	Nárazový zkratový proud
$K$	Korekční součinitel pro impedance
$m$	Činitel pro tepelné účinky stejnosměrné složky
$n$	Činitel pro tepelné účinky střídavé složky
$NN$	Nízké napětí
$P_{krT}$	Jmenovité ztráty nakrátko transformátoru
$P_{rM}$	Jmenovitý činný výkon asynchronního
$R$	Rezistance, absolutní příp. poměrná hodnota
$S$	Průřez vodiče
$S''_k$	Počáteční souměrný rázový zkratový výkon
$S_k$	Zkratový výkon
$T$	Transformátor
$t_{min}$	Minimální doba vypnutí
$t$	Doba trvání zkratu
$t_r$	Jmenovitý převod transformátoru
$T_{d.c.}$	Časová konstanta zániku stejnosměrné složky
$T_{kmax}$	Max. doba trvání zkratového proudu
$U_n$	Jmenovité napětí soustavy
$U_r$	Jmenovité napětí zařízení
$U_{rT}$	Jmenovité napětí transformátoru

$u_{kr}$	Jmenovité napětí nakrátko transformátoru
$u_{kR}$	Napětí nakrátko reaktoru omezujícího zkrat
$u_{Rr}$	Činná složka jmenovitého napětí nakrátko transformátoru
$u_{Xr}$	Induktivní složka jmenovitého napětí nakrátko transformátoru
$U_{(1)}$	Napětí sousledné složkové soustavy
$U_{(2)}$	Napětí zpětné složkové soustavy
$U_{(0)}$	Napětí netočivé složkové soustavy
VN	Vysoké napětí
VVN	Velmi vysoké napětí
$X$	Reaktance, absolutní příp. poměrná hodnota
$X_d$	Synchronní reaktance podélná příp. příčná
$X''_d$	Rázová reaktance synchronního stroje (nasycená hodnota), podélná případně příčná
$x_d$	Nenasycená synchronní reaktance, poměrná hodnota
$Z$	Impedance, absolutní příp. poměrná hodnota
$Z_k$	Zkratová impedance trojfázové střídavé soustavy
$Z_{(1)}$	Sousledná impedance zkratového obvodu
$Z_{(2)}$	Zpětná impedance zkratového obvodu
$Z_{(0)}$	Netočivá impedance zkratového obvodu
ZVN	Zvláště vysoké napětí
$\alpha$	Teplotní součinitel
$\eta$	Účinnost asynchronních motorů
$\kappa$	Součinitel pro výpočet nárazového zkratového proudu
$\lambda$	Součinitel pro výpočet ustáleného zkratového proudu
$\mu$	Součinitel pro výpočet souměrného zkratového proudu
$\mu_0$	Absolutní permeabilita vakua, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$
$\rho$	Rezistivita (měrný odpor)
$\theta_e$	Teplota vodiče na konci zkratu
ČSN	Česká státní norma
EN	Evropská norma

## Obsah:

<b>ÚVOD .....</b>	<b>1</b>
<b>1 TEORETICKÝ ROZBOR ZKRATOVÝCH JEVŮ .....</b>	<b>2</b>
1.1 ZÁKLADNÍ POJMY .....	2
1.2 DRUHY ZKRATŮ.....	3
1.3 PRŮBĚH ZKRATOVÉHO PROUDU .....	6
1.4 PŘÍČINY VZNIKU ZKRATU .....	9
1.4.1. Vznik zkratů .....	9
1.5 NÁSLEDKY ZKRATŮ.....	10
1.5.1. Účinky zkratových proudů .....	10
<b>2 METODIKA VÝPOČTU ZKRATOVÝCH POMĚRŮ DLE ČSN EN 60909 .....</b>	<b>12</b>
2.1 Postup výpočtu .....	12
2.2 Předpoklady výpočtu .....	12
2.2.1. Maximální zkratové proudy.....	13
2.2.2. Minimální zkratový proud .....	13
2.3 Metoda souměrných složek.....	14
2.4 Počáteční souměrný rázový zkratový proud $I_k''$ .....	15
2.5 Nárazový zkratový proud .....	16
2.6 Vypínací zkratový proud .....	17
2.7 Souměrný vypínací zkratový proud .....	17
2.7.1. Vzdálený zkrat .....	18
2.7.2. Blízký zkrat.....	18
2.8 Ustálený zkratový proud.....	18
2.9 Ekvivalentní oteplovací proud .....	18
2.10 Zkratové impedance elektrických zařízení.....	20
<b>3 PROBLEMATIKA NAPÁJENÍ PRŮMYSL OVÉHO OBJEKTU.....</b>	<b>26</b>
3.1 Rozvodná zařízení .....	26
3.2 Transformátory.....	27
3.3 Umístění transformátorů a rozvaděčů .....	29
3.4 Požadavky na elektrické rozvody a zařízení.....	30

3.5	Stupeň dodávky elektrické energie .....	32
<b>4</b>	<b>POPIS ROZVODNÉ SÍTĚ PRŮMYSLOVÉHO OBJEKTU .....</b>	<b>34</b>
<b>5</b>	<b>VÝPOČET ZKRATOVÝCH POMĚRŮ PRŮMYSLOVÉHO OBJEKTU.....</b>	<b>36</b>
5.1	Vstupní data pro výpočet zkratových proudů .....	36
5.2	Zkratové příspěvky NN motorů .....	39
5.3	Zkratové příspěvky VN motorů.....	42
5.4	Výpočet maximálních zkratových poměrů na rozvodně R 6-HL.....	44
5.5	Výpočet minimálních zkratových poměrů na rozvodně R 6-HL. ....	48
5.6	Výpočet zkratových poměrů rozveden napájených z rozvodny R6 HL. 49	
5.6.1	Rozvodna R 6-12 .....	49
5.6.2	Zkratové poměry sítě napájené z rozvodny R6 HL. ....	51
5.7	Kontrola kabelů VN na dovolené oteplení při zkratu .....	51
<b>6</b>	<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>53</b>
	<b>POUŽITÁ LITERATURA .....</b>	<b>54</b>
	<b>SEZNAM PŘÍLOH .....</b>	<b>1</b>



## Úvod

V každém elektrickém zařízení je třeba počítat nejen s normálními provozními stavy, ale také s poruchovými stavy jako je přepětí, přetížení, zemní spojení nebo také zkrat. I když je zařízení projektováno a vybudováno podle platných norem a předpisů s ohledem na provozní bezpečnost, spolehlivost a bezpečnost obsluhujících osob, je třeba počítat i s uvedenými poruchami, které se mohou vyskytnout. Když už se daný nepříznivý provozní stav vyskytne, je třeba tento provozní stav co v nejkratším čase omezit a odstranit, aby nedošlo k nebezpečným poruchám na daném zařízení, v horším případě i k úrazu osob.

Jednou z nejvážnějších a nejčastějších poruch, které se vyskytují na elektrickém zařízení je zkrat. Zkrat je v podstatě náhodné nebo úmyslné spojení dvou nebo více vodivých částí, jejichž elektrický potenciál je roven nule nebo se tato hodnota k ní blíží. Může mít několik příčin, jako jsou nedokonalosti a vady elektrických zařízení, poškození cizími zásahy a povětrnostními vlivy, chybnou manipulací a přepětím. Působení elektrického zkratu je většinou krátkodobé, ale vzhledem k velikostem zkratových poruchových proudů může dojít k nebezpečným účinkům na elektrických zařízeních. Proto je potřeba daná zařízení chránit na účinky zkratových proudů. Nejčastěji se jako ochrana zkratových proudů používá jednoduchá, ovšem velice účinná pojistka popřípadě jistič. Zabránění vzniku poruchových stavů lze samozřejmě prevencí, ta je velice důležitá. Prevence spočívá v používání kvalitní nepoškozené elektrické spotřebiče a dodržovat další běžné zásady bezpečné práce s elektrickými zařízeními.

Diplomovou práci jsem rozdělil na dvě části, část teoretickou a část praktickou. V teoretické části jsem popsal jednotlivé druhy zkratů a jejich příčiny, způsoby výpočtu dle normy ČSN EN 60909 a problematiku napájení průmyslového objektu. V praktické části jsem se již zabýval samotným řešením problému při vzniku zkratu na jednotlivých rozvodnách zadaného objektu a zjištění velikosti těchto zkratových proudů, jakými je namáhán rozvod 6 kV. Na závěr jsem zkontroloval jednotlivé kabely VN na dovolené oteplení, která vznikají v důsledku zkratu a průchodu nebezpečných proudů.

# 1 Teoretický rozbor zkratových jevů

## 1.1 Základní pojmy

[5]

**Zkrat:** náhodné nebo úmyslné spojení dvou nebo více vodivých částí, jehož důsledkem je, že rozdíl elektrických potenciálů mezi těmito vodivými částmi je roven nule nebo má hodnotu blízkou nule.

**Zkratový proud:** nadproud způsobený zkratem v elektrické soustavě.

**Předpokládaný zkratový proud:** proud protékající obvodem, pokud by byl zkrat nahrazen ideálním spojením se zanedbatelnou impedancí bez změny napájení.

**Souměrný zkratový proud:** efektivní hodnota střídavé souměrné složky předpokládaného zkratového proudu se zanedbatelnou eventuální aperiodickou složkou proudu.

**Počáteční souměrný rázový zkratový proud  $I''_k$ :** efektivní hodnota střídavé souměrné složky předpokládaného zkratového proudu v okamžiku vzniku zkratu při konstantní impedanci.

**Stejnosměrná (aperiodická) složka zkratového proudu  $i_{d.c.}$ :** střední hodnota horní a dolní obalové křivky průběhu zkratového proudu, který klesá ze své počáteční hodnoty k nule.

**Nárazový zkratový proud  $i_p$ :** maximální možná hodnota předpokládaného zkratového proudu.

**Souměrný vypínací zkratový proud  $I_b$ :** efektivní hodnota úplné periody souměrné složky předpokládaného zkratového proudu v okamžiku oddělení kontaktů prvního pólu spínacího zařízení.

**Ustálený zkratový proud  $I_k$ :** efektivní hodnota zkratového proudu, který zůstává po odeznění zkratového přechodného jevu.

**Ekvivalentní elektrický obvod:** model určený k popisu chování obvodu pomocí sítě ideálních prvků.

**Záběrový proud  $I_{LR}$ :** největší souměrný efektivní proud asynchronního motoru se zabrzděným rotorem, který je napájen jmenovitým napětím  $U_{rM}$  při jmenovitém kmitočtu.

**Jmenovité napětí sítě  $U_n$ :** sdružené napětí, kterým je síť označena a k němuž se vztahují provozní charakteristiky.

**Napětí ekvivalentního zdroje**  $c \cdot U_n / \sqrt{3}$  : napětí ideálního zdroje přiloženého v místě zkratu v sousledné složkové soustavě.

**Napětový součinitel c**: poměr mezi napětím ekvivalentního napětového zdroje a jmenovitým napětím sítě  $U_n$  děleným  $\sqrt{3}$ .

**Elektricky vzdálený zkrat**: zkrat, při kterém velikost souměrné složky předpokládaného zkratového proudu zůstává v podstatě konstantní.

**Elektricky blízký zkrat**: zkrat, při kterém příspěvek alespoň jednoho synchronního stroje k předpokládanému počátečnímu souměrnému rázovému zkratovému proudu překračuje dvojnásobek jmenovitého proudu stroje nebo zkrat, při kterém příspěvek asynchronních motorů překračuje 5 % počátečního souměrného rázového zkratového proudu  $I''_k$ .

**Minimální doba vypnutí  $t_{min}$** : nejkratší čas mezi počátkem zkratového proudu a přerušením kontaktu prvního vypínacího pólu spínacího přístroje.

**Ekvivalentní oteplovací zkratový proud  $I_{th}$** : efektivní hodnota proudu, který má stejné tepelné účinky a stejnou dobu trvání jako skutečný zkratový proud, který může obsahovat stejnosměrnou složku a s časem se mění.

## 1.2 Druhy zkratů

[1]

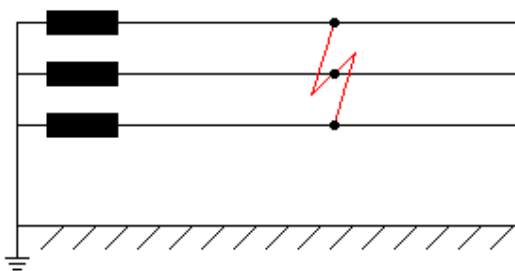
Jednou z nejvážnějších poruch, které je nutno předpokládat v elektrických zařízeních, hlavně silnoproudých, je zkrat. Zkrat způsobí nadměrný vzrůst proudu nad obvyklou provozní hodnotu tím, že jsou z elektrického obvodu vyřazeny spotřebiče, které představují hlavní část odporu obvodu. Obvod mezi místem zkratu a zdroji, které jej napájejí, budeme nazývat zkratovým obvodem.

Kdyby spojovací vedení, transformátory, generátory a ostatní části elektrického obvodu neměly žádný odpor, pak by zkratovým obvodem protékal podle Ohmova zákona proud nekonečně velký. Ve skutečnosti je však ve zkratovém obvodu vždy zařazen určitý odpor, který se skládá z vnitřních impedancí generátorů a transformátorů, z impedancí vedení (kabelů, přípojníc, venkovních vedení) a z přechodových odporů jak na spojích, tak i v místě zkratu samém, takže zkratový proud dosáhne nějaké konečné velikosti. Avšak i za těchto okolností jsou zkratové proudy tak velké, že téměř ve všech případech vážně ohrožují jak celé elektrické zařízení, tak i životy obsluhujícího personálu.

Napětí v místě zkratu klesne na nepatrnou velikost (při dokonalém zkratu teoreticky až na nulu), takže celé vnitřní napětí zdroje se spotřebuje na úbytky napětí v alternátorech, transformátorech, venkovních, popř. kabelových vedení, nebo dalších prvcích sítě. V celém postiženém obvodu se projeví pokles napětí, který vzrůstá od zdrojů až k místu zkratu. Napětí v jednotlivých místech zkratového obvodu se nazývají napětí zbytková, kterým pak odpovídají proudy tekoucí při zkratu ještě do připojených odběrů do nepostižených větví.

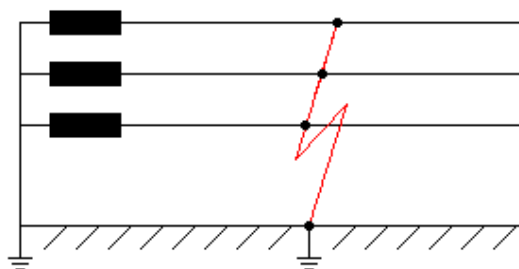
K chybnému spojení může dojít v trojfázové soustavě mezi různými vodiči. Mluvíme pak o těchto druzích zkratu:

- trojfázový zkrat – nastane při spojení všech tří fází elektrizační soustavy v jednom místě,



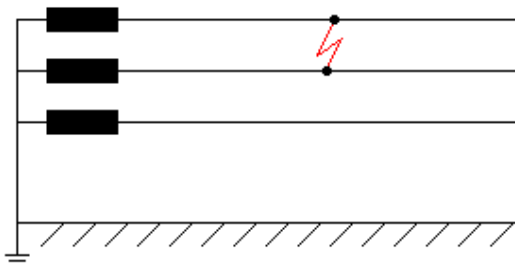
**Obr. 1.1: Trojfázový zkrat.**

- trojfázový zemní zkrat – nastane při spojení všech tří fází navzájem a jejich současném spojení se zemí,



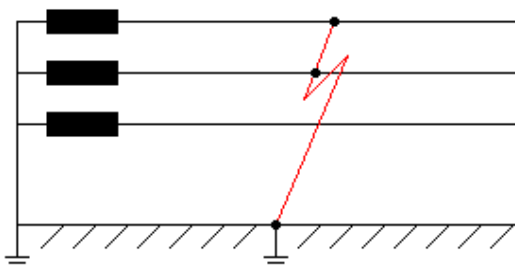
**Obr. 1.2: Trojfázový zemní zkrat.**

- dvoufázový zkrat – nastane při spojení dvou libovolných fází trojfázové soustavy v jednom místě,



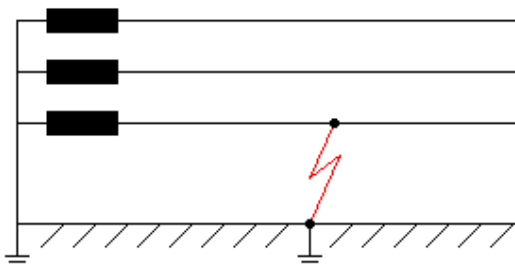
Obr. 1.3: Dvoufázový zkrat.

- dvoufázový zemní zkrat – nastane, jsou-li dvě spojené fáze současně spojeny se zemí,



Obr. 1.4: Dvoufázový zemní zkrat.

- jednofázový zkrat – nastává při spojení jedné fáze se zemí nebo středním vodičem, pokud se jedná o soustavu se středním vodičem,



Obr. 1.5: Jednofázový zkrat.

Souměrný zkrat nastává při dokonalém spojení všech tří vodičů navzájem, čímž jsou postiženy všechny tři fáze a v jehož důsledku teče všemi vodiči stejný zkratový proud. Vyskytuje se nejčastěji u kabelových sítí a mívá nejvyšší hodnoty předpokládaného zkratového proudu.

Nesouměrné zkraty:

- dvoufázový zkrat,
- dvoufázový zemní zkrat,
- jednofázový zkrat,

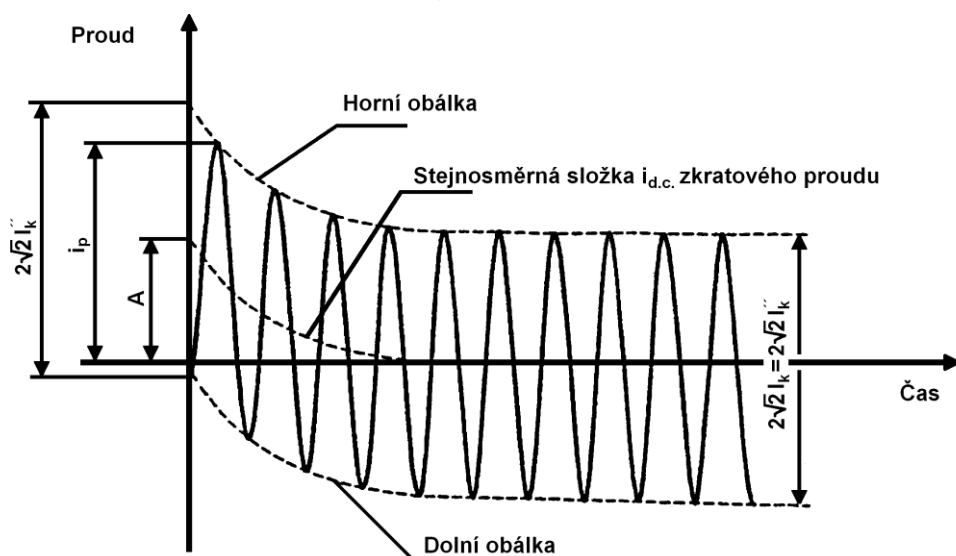
Pouze trojfázový zkrat působí na zkratový obvod symetricky. Ostatní druhy zkratů zatěžují obvod nesymetricky.

### 1.3 Průběh zkratového proudu

[5]

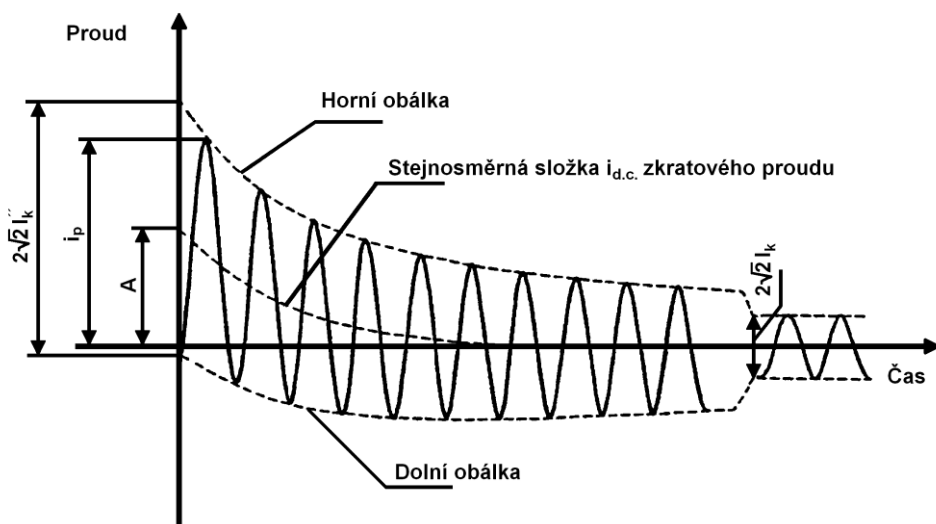
Při každém zkratu, bez ohledu na příčiny, která jej vyvolala, jde o přechod z normálního stavu na stav poruchový, tj. přechod z normálního proudu na ustálený proud zkratový. Tento přechod se neděje skokem v jediném okamžiku. Odehrávají se tu významné změny elektrického stavu, které trvají určitou dobu, jež je závislá na velikosti elektromagnetické energie ve zkratovém obvodu. Pro tuto dobu se nemění proud jen podle periodicky probíhajících funkcí, nýbrž se tu vyskytují i vyrovnávací proudy, které tento přechod zprostředkují.

Obecný průběh zkratového proudu se skládá ze dvou hlavních složek: se složky stejnosměrné  $i_{d.c.}$ , a ze složky střídavé, kmitající kolem stejnosměrné složky průmyslovým kmitočtem s amplitudou postupně klesající.



Obr. 1.6: Průběh zkratového proudu elektricky vzdáleného zkratu s konstantní střídavou složkou.

- $I_k''$  - počáteční souměrný rázový zkratový proud,
- $i_p$  - nárazový zkratový proud,
- $I_k$  - ustálený zkratový proud,
- $i_{d.c.}$  - stejnosměrná složka zkratového proudu,
- $A$  - počáteční hodnota stejnosměrné složky  $i_{d.c.}$ ,



Obr. 1.7: Průběh zkratového proudu elektricky blízkého zkratu s klesající střídavou složkou.

- $I_k''$  - počáteční souměrný rázový zkratový proud,
- $i_p$  - nárazový zkratový proud,
- $I_k$  - ustálený zkratový proud,
- $i_{d.c.}$  - stejnosměrná složka zkratového proudu,
- $A$  - počáteční hodnota stejnosměrné složky  $i_{d.c.}$ ,

Stejnosemerna složka  $i_{d.c.}$  – klesá s časem podle rovnice a přibližně po 0,25 s zanikne. Počáteční velikost stejnosměrné složky se liší podle okamžiku, ve kterém zkrat nastane. Zkratový proud má ve většině případů indukční charakter. Zpožďuje se tedy za napětím asi o  $90^\circ$ . Lze tedy tvrdit, že stejnosměrná složka bude maximální, vznikne-li zkrat v okamžiku, kdy je napětí nejmenší. Vzhledem ke skutečnosti, že fázová napětí jednotlivých fází jsou vzájemně o  $120^\circ$  pootočena, dojde k výskytu maximální stejnosměrné složky jen v jedné fázi. V ostatních fázích je tato složka vždy menší.

$$i_{d.c.} = -i_{ks0} \cdot e^{-\frac{t}{T_{d.c.}}} \quad [kA; kA, s, s] \quad (1.1)$$

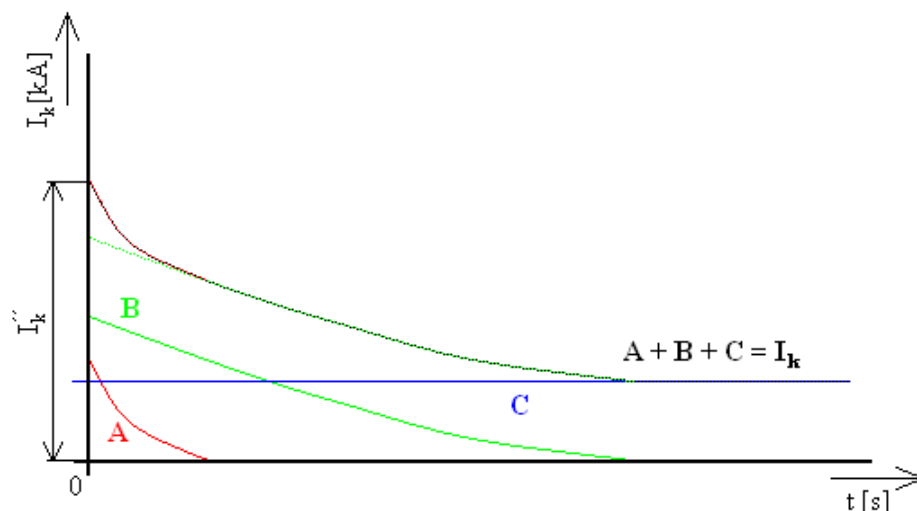
- $i_{ks0}$  - okamžitá hodnota střídavé složky zkratového proudu v čase  $t = 0$ ,
- $t$  - doba trvání zkratu,
- $T_{d.c.}$  - časová konstanta zániku stejnosměrné složky ( $T_{d.c.} = 0,05 \div 0,3$  s),

Střídavá složka proudu je souměrná podle osy času, a nazývá se proto také souměrným zkratovým proudem. Stejný průběh má zkratový proud ve fázi, ve kterém nevznikla stejnosměrná složka. Střídavá složka zkratového proudu se skládá obecně ze tří složek.

- A** – rázová složka zkratového proudu,
- B** – přechodná složka zkratového proudu,
- C** – ustálená složka zkratového proudu,

Všechny tři složky mají sinusový průběh o kmitočtu soustavy; zatímco složky soustavy A a B exponenciálně klesají, zůstává složka C po dobu trvání zkratu neměnná.





Obr. 1.8: Efektivní hodnota souměrného zkratového proudu.

## 1.4 Příčiny vzniku zkratu

[2]

K dokonalému zkratu dochází poměrně zřídka. Je většinou způsoben zapomenutým kovovým náradím na živých částech (přípojnících), neodstraněnou zkratovací soustavou po práci na elektrickém zařízení, porušením kabelu kovovým předmětem při výkopových pracích apod. Často se také změni v obloukový zkrat. Ostatní příčiny vedou obvykle k obloukovému (dokonalému) zkratu.

### 1.4.1. Vznik zkratů

- Různé vady zařízení, hlavně nedokonalá izolace – buď z výrobních důvodů (materiály, nevhodná technologie výroby atd.), nebo z důvodu špatné montáže (nepředpisové pokládání kabelů, nedodržení technologie při montáži kabelových spojek, koncovek atd.) K tomu přistupují též poruchy z důvodu zhoršení kvality izolace i dlouhodobě přetěžovaných kabelových vedení – urychlené stárnutí izolace nadproudem.
- Přepětí – buď atmosférická, nebo i provozní způsobí často přerušení izolace a následný zkrat. Atmosférická přepětí vznikají ve venkovních vedeních elektrostatickou indukcí při výbojích mimo vedení nebo přímým úderem blesku do vedení. Provozní přepětí vznikají v elektrických zařízeních při poruchových stavech, při určitých spínacích

pochodech, při náhlé ztrátě zatížení a při nesouměrných stavech. Kromě toho musíme uvažovat i přepětí, která vznikají vlivem rezonančních stavů v elektrické soustavě, tzv. rezonanční přepětí.

- Cizí zásahy (lidé, přírodní vlivy) – jedná se o velmi častou příčinu vzniku zkratu, např. překopnutí, přetržení kabelu při zemních pracech všeho druhu, dále sesuvy půdy, pády stromů do venkovního vedení.
- Nedostatečná zkratová odolnost zařízení – vyskytuje se u starších, nerekonstruovaných zařízení v soustavách s prudkým nárůstem hodnot zkratových proudů.
- Vlivem selhání lidského činitele – chybné manipulace v různých elektrických zařízeních, např. vypnutí přípojnicového odpojovače při zatížení v rozvodech VN a VVN. Dále je to ponechání cizích předmětů v zařízení po předchozí demontáži atd. Nutno dodat, že zkraty v důsledku chyb uvedených v této části jsou velice vážné poruchy většinou s těžkými následky jak pro zařízení, tak pro obsluhu.

## 1.5 Následky zkratů

Zkraty se v elektrickém zařízení projevují četnými nepříznivými následky, které mohou nejen ohrozit bezpečnost provozu, bezpečnost zařízení, ale vážně ohrožují i bezpečnost obsluhujících pracovníků. Elektrické zařízení je proto nutno dimenzovat nejen s ohledem na provozní poměry, ale i na poměry při zkratu, aby následky byly omezeny jen na neodstranitelné průvodní jevy.

### 1.5.1. Účinky zkratových proudů

- Dynamické síly vznikají elektromagnetickým působením proudů v sousedních vodičích a jsou jim přímo úměrné. Největší silový ráz je způsoben první amplitudou zkratového proudu tzv. nárazovým zkratovým proudem. Dosahuje takových hodnot, že může vážně ohrozit elektrická zařízení, pokud nejsou dimenzována tak, že těmito silám bezpečně odolávají.
- Tepelné účinky zkratového proudu jsou v nedostatečně dimenzovaných zařízeních neméně ničivé. Průchodem zkratového proudu zkratovým obvodem nastává nadměrné oteplení všech částí zkratového obvodu se všemi nepříznivými následky. Během krátké

doby trvání zkratu nemůže být teplo odvedeno do okolního prostředí a způsobuje velké oteplení. Nastává předčasné stárnutí izolace vodičů, strojů a přístrojů.

- Obloukový zkrat se může vytvořit prakticky ve všech případech. V rozvodných zařízeních, kde musíme především počítat s ohrožením bezpečnosti obsluhujících osob, dochází zde k obloukovému zkratu především chybnou manipulací s odpojovači. Účinky elektrického oblouku jsou způsobeny především jeho zářením a tlakem, vyvolaným energií oblouku a tepelným a světelným zářením.
- Zkratové proudy se projevují indukčními účinky na sousedním vedení indukovaným napětím. Jsou to zejména slaboproudá, sdělovací a jisticí. Podél těchto vedení se mohou indukovat značná napětí, zejména když se zkratový proud vrací zpět zemi tj. u zkratů jednofázových, dvoufázových zemních a simultánních.
- Přepětí – v souvislosti s vypínáním zkratových proudů vznikají v rozvodech přepětí dosahující hodnoty dvojnásobku  $U_n$ .

Uvedené následky zkratových proudů jsou velmi závažné, obzvláště proto, že se obvykle v praxi projevují současně. Lze je pochopitelně snížit omezením zkratových proudů. Pokud dojde ke zkratu, nelze je vyloučit. Dynamické, tepelné a přepětěvé účinky lze zvládnout dostatečným dimenzováním elektrických zařízení a rozvodů. Vznik elektrického oblouku se může do jisté míry omezit použitím kvalitních a dostatečně dimenzovaných přístrojů a vodičů a odborným provedením elektromontážních prací. Nelze však vyloučit příčiny, dané hrubým lidským selháním.

## 2 Metodika výpočtu zkratových poměrů dle ČSN EN 60909

### 2.1 Postup výpočtu

[3, 5]

Nakreslíme jednopólové schéma zapojení obvodu, do kterého zapíšeme parametry jednotlivých prvků vztažené k jejich jmenovitému výkonu a napětí. Provedeme výpočet náhradních impedancí jednotlivých zkratových příspěvků. Z tohoto schématu odvodíme schéma sousledné, je-li zapotřebí zpětné a netočivé složky. Pro každý složkový systém určíme jeho impedance. Z výsledné impedance vypočteme počáteční rázový zkratový proud  $I''_k$ . Později vypočteme vypínací proud  $I_b$ , nárazový zkratový proud  $i_p$  a ekvivalentní oteplovací proud  $I_{th}$ . Při výpočtu se předpokládá, že parametry prvků elektrické soustavy se během zkratu nemění. Soustava před zkratem se předpokládá symetrická. Předpokládá se, že zkraty vznikají v jednom místě současně. Neuvažujeme s vlivem elektrického oblouku na velikosti zkratového proudu.

### 2.2 Předpoklady výpočtu

Výpočet maximálních a minimálních zkratových proudů vychází z následujících zjednodušení:

- Po dobu trvání zkratového proudu se nemění typ zkratu, tj. trojfázový zkrat zůstává trojfázovým a zkrat mezi fází a zemí zůstává po celou dobu zkratem mezi fází a zemí.
- Po dobu zkratu nedochází k žádné změně v síti.
- Uvažují se impedance transformátorů pro přepínače odboček v základní poloze. To je přípustné, protože je zaveden korekční součinitel pro impedance pro síťové transformátory.
- Odpor oblouku se neuvažují.
- Všechny kapacity vedení a paralelní admitance a netočivé statické zátěže jsou zanedbány vyjma paralelních admitancí v netočivé soustavě.

### 2.2.1. Maximální zkratové proudy

Při výpočtu maximálních zkratových proudů je nutné zvolit následující podmínky:

- Pro výpočet maximálních zkratových proudů se musí použít napěťový součinitel  $c_{\max}$ , pokud není příslušná národní norma.
- Vybrat konfiguraci soustavy a maximální příspěvky z elektráren a síťových napáječů tak, aby vedly k maximální hodnotě zkratového proudu v místě zkratu nebo pro přijaté dělení sítě pro omezení zkratového proudu.
- Pokud je použita ekvivalentní impedance  $\bar{Z}_Q$  jako reprezentující vnější síť, musí se použít minimální ekvivalentní zkratová impedance, která odpovídá maximálnímu příspěvku zkratových proudů od síťových napáječů.
- Motory musí být zahrnuty.
- Užívají se rezistance  $R_L$  vedení (venkovních vedení a kabelů) při teplotě 20°C.

### 2.2.2. Minimální zkratový proud

Při výpočtu minimálních zkratových proudů je nutné zvolit následující podmínky:

- Pro výpočet minimálních zkratových proudů se musí použít napěťový součinitel  $c_{\min}$ .
- Vybrat konfiguraci soustavy a minimální příspěvky z elektráren a síťových napáječů tak, aby vedly k maximální hodnotě zkratového proudu v místě zkratu.
- Motory musí být zanedbány.
- Rezistance  $R_L$  vedení (venkovních vedení a kabelů, vodičů a středních vodičů) se musí uvažovat při největší teplotě:

$$R_L = [1 + \alpha \cdot (\vartheta_e - 20^\circ\text{C})] \cdot R_{L20} \quad (2.1)$$

$R_{L20}$  - rezistance při teplotě 20°C,

$\vartheta_e$  - teplota vodiče ve stupních Celsia na konci zkratu,

$\alpha$  - součinitel rovný  $\frac{0,004}{K}$ , platný s dostatečnou přesností pro praktické účely pro měď, hliník a slitiny hliníku,

## 2.3 Metoda souměrných složek

Výpočet hodnot proudů v trojfázových soustavách při souměrných a nesouměrných zkratech se zjednoduší použitím souměrných složek. Předpokládá se přitom, že elektrické zařízení má symetrickou strukturu, například v případě transponovaných venkovních vedení. Výsledky výpočtu zkratových proudů mají přijatelnou přesnost také i v případě netransponovaných venkovních vedení.

Při použití této metody se zjistí proudy v každé fázi superponováním proudů tří souměrných složkových soustav:

- proud sousledné složkové soustavy  $\underline{I}_{(A)}$ ,
- proud zpětné složkové soustavy  $\underline{I}_{(B)}$ ,
- proud netočivé složkové soustavy  $\underline{I}_{(C)}$ ,

$$\begin{aligned}\underline{I}_A &= \underline{I}_1 + \underline{I}_2 + \underline{I}_0 \\ \underline{I}_B &= \underline{a}^2 \underline{I}_1 + \underline{a} \underline{I}_2 + \underline{I}_0 \\ \underline{I}_C &= \underline{a} \underline{I}_1 + \underline{a}^2 \underline{I}_2 + \underline{I}_0\end{aligned}\tag{2.2}$$

$$\underline{a} = -\frac{1}{2} + j\frac{1}{2}\sqrt{3} \quad \underline{a}^2 = -\frac{1}{2} - j\frac{1}{2}\sqrt{3}\tag{2.3}$$

- napětí sousledné složkové soustavy  $\underline{U}_{(A)}$ ,
- napětí zpětné složkové soustavy  $\underline{U}_{(B)}$ ,
- napětí nulové složkové soustavy  $\underline{U}_{(C)}$ ,

$$\begin{aligned}\underline{U}_A &= \underline{U}_1 + \underline{U}_2 + \underline{U}_0 \\ \underline{U}_B &= \underline{a}^2 \underline{U}_1 + \underline{a} \underline{U}_2 + \underline{U}_0 \\ \underline{U}_C &= \underline{a} \underline{U}_1 + \underline{a}^2 \underline{U}_2 + \underline{U}_0\end{aligned}\tag{2.4}$$

Výsledná podoba symetrické složky napětí a proudu:

$$\begin{aligned}\underline{U}_1 &= \frac{1}{3}(\underline{U}_A + \underline{a}\underline{U}_B + \underline{a}^2\underline{U}_C) \\ \underline{U}_2 &= \frac{1}{3}(\underline{U}_A + \underline{a}^2\underline{U}_B + \underline{a}\underline{U}_C) \\ \underline{U}_0 &= \frac{1}{3}(\underline{U}_A + \underline{U}_B + \underline{U}_C)\end{aligned}\tag{2.5}$$

$$\begin{aligned}\underline{I}_1 &= \frac{1}{3}(\underline{I}_A + \underline{a}\underline{I}_B + \underline{a}^2\underline{I}_C) \\ \underline{I}_2 &= \frac{1}{3}(\underline{I}_A + \underline{a}^2\underline{I}_B + \underline{a}\underline{I}_C) \\ \underline{I}_0 &= \frac{1}{3}(\underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C)\end{aligned}\tag{2.6}$$

## 2.4 Počáteční souměrný rázový zkratový proud $I_k''$

při trojfázovém zkratu:

$$I_{k3}'' = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{R_k^2 + X_k^2}} = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot |\bar{Z}_{(k)}|} \quad [kA, -, kV, \Omega] \tag{2.7}$$

při dvoufázovém zkratu:

$$I_{k2}'' = \frac{c \cdot U_n}{|\bar{Z}_{(1)} + \bar{Z}_{(2)}|} \quad [kA, -, kV, \Omega] \tag{2.8}$$

při jednofázovém zkratu:

$$I_{k1}'' = \frac{c \cdot \sqrt{3} \cdot U_n}{|Z_{(1)} + Z_{(2)} + Z_{(0)}|} \quad [kA, -, kV, \Omega] \tag{2.9}$$

$c$  - napěťový součinitel,

$U_n$  - jmenovité sdružené napětí v místě zkratu,

$Z_{(1)}$  - výsledná sousledná impedance zkratového obvodu,

$Z_{(2)}$  - výsledná zpětná impedance zkratového obvodu,

$Z_{(0)}$  - výsledná netočivá impedance zkratového obvodu,

Zkrat v soustavě	$c_{\max}$	$c_{\min}$
Nízké napětí 100 V až 1000V	1,05 1,10	0,95
Vysoké napětí >1 kV až 35 kV	1,10	1,00
Velmi vysoké napětí >35 kV		

Tab. 2.1: Napět'ové činitele.

## 2.5 Nárazový zkratový proud

Nárazový zkratový proud  $i_p$  namáhá celý obvod zkratu (tj. vypínače, sběrnice, vinutí transformátoru apod.) elektrodynamickými silami. Definován je jako vrcholová hodnota první amplitudy zkratového proudu při nejvyšší možné stejnosměrné složce.

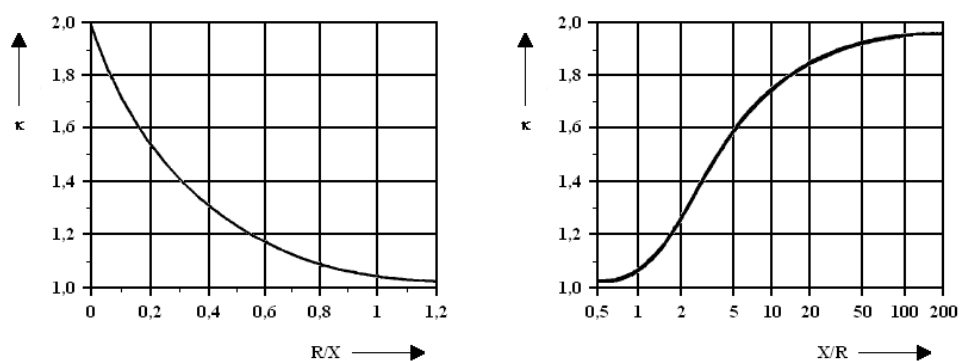
$$i_p = \kappa \cdot \sqrt{2} \cdot I_k'' \quad (\text{kA}) \quad (2.10)$$

$I_k''$  - počáteční rázový zkratový proud,

$\kappa$  - součinitel nárazového zkratového proudu pro poměr  $R/X$  nebo  $X/R$  se musí určit z obr. 2.1 nebo vypočítat z následujícího vztahu,

$$\kappa = 1,02 + 0,98 \cdot e^{-3 \frac{R}{X}} \quad (2.11)$$





Obr. 2.1: Součinitel  $\kappa$  pro sériové obvody jako funkce poměru  $R/X$  nebo  $X/R$ .

## 2.6 Vypínací zkratový proud

V součinu s napětím místa zkratu představuje tzv. zkratový výkon a je jedním z hlavních údajů vypínačů. Pro volbu vypínače se určuje souměrný vypínací proud a stejnosměrná složka vypínacího zkratového proudu, obě hodnoty pro nejkratší dobu vypnutí  $T_{\min}$ .

## 2.7 Souměrný vypínací zkratový proud

Vypínací zkratový proud v místě zkratu se skládá ze symetrického zkratového proudu  $I_b$  a stejnosměrné složky zkratového proudu  $i_{d.c.}$  v čase  $T_{\min}$  podle této rovnice:

$$i_{d.c.} = \sqrt{2} I_k'' e^{-2 \cdot \pi \cdot f \cdot t \cdot R/X} \quad (2.12)$$

$I_k''$  – počáteční souměrný rázový zkratový proud,

$f$  – jmenovitý kmitočet,

$t$  – čas,

### 2.7.1. Vzdálený zkrat

U vzdálených zkratů jsou zkratové souměrné vypínací proudy rovny počátečním rázovým zkratovým proudům:

$$I_b = I_k'' \quad (\text{kA}) \quad (2.13)$$

### 2.7.2. Blízký zkrat

V případě jednoduchého napájení zkratu, nebo u nezaúhlených sítí se zmenšování souměrného zkratového vypínacího proudu zohledňuje pomocí součinitele  $\mu$  podle rovnice.

$$I_b = \mu \cdot I_k'' \quad (\text{kA}) \quad (2.14)$$

$\mu$  – součinitel, který představuje poměr efektivní hodnoty celkového vypínacího zkratového proudu a efektivní hodnoty subtransitního proudu,

## 2.8 Ustálený zkratový proud

Pro zkraty počítané jako zkraty elektricky vzdálené, pro dimenzování zařízení:

$$I_k = I_k'' \quad (\text{kA}) \quad (2.15)$$

$I_k$  - počáteční rázový zkratový proud bez uvažování vlivu asynchronních motorů,

## 2.9 Ekvivalentní oteplovací proud

Integrál  $\int i^2 dt$  určuje energii vytvářenou v odporovém prvku soustavy průchodem zkratového proudu. Používá se součinitel  $m$  pro časově závislý tepelný účinek stejnosměrné

složky zkratového proudu a součinitele  $n$  pro časově závislý tepelný účinek střídavé složky zkratového proudu (viz obr. 2.2 a 2.3).

$$\int_0^{T_k} i^2 dt = I_k'^2 (m+n) T_k = I_{th}^2 T_k \quad (\text{kA}) \quad (2.16)$$

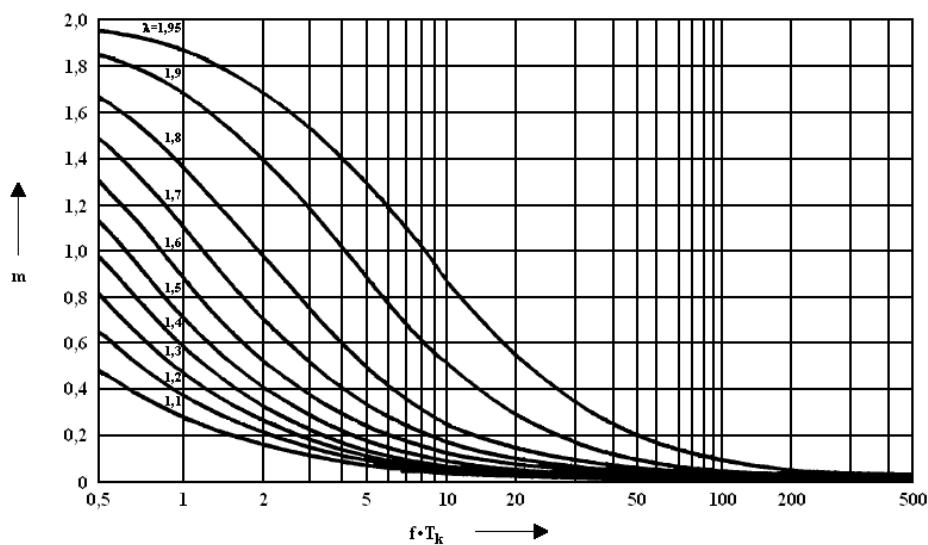
$T_k$  - doba trvání zkratu,

Ekvivalentní oteplovací zkratový proud je:

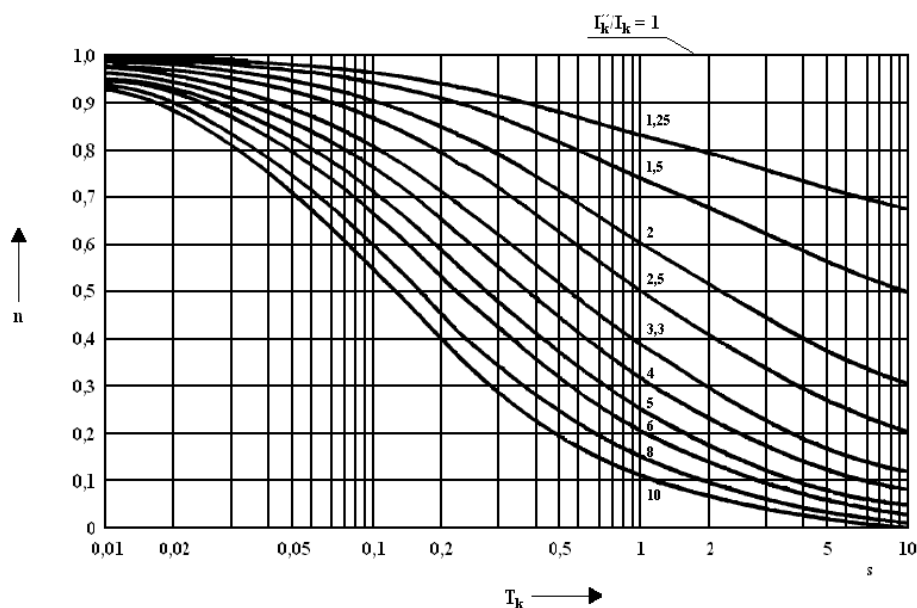
$$I_{ke} = I_k'' \cdot \sqrt{m+n} \quad (\text{kA}) \quad (2.17)$$

$m$  – součinitel pro tepelné účinky stejnosměrné složky,

$n$  - součinitel pro tepelné účinky střídavé složky,



Obr. 2.2: Součinitel  $m$  pro tepelný účinek stejnosměrné složky zkratového proudu.



Obr. 2.3: Součinitel  $n$  pro tepelný účinek střídavé složky zkratového proudu.

## 2.10 Zkratové impedance elektrických zařízení

U síťových napáječů, transformátorů, venkovních vedení, kabelů, reaktorů a podobného zařízení jsou si sousledná a zpětná zkratová impedance soustavy rovny:  $\bar{Z}_{(1)} = \bar{Z}_{(2)}$ .

Netočivá zkratová impedance  $\bar{Z}_{(0)} = \frac{\bar{U}_{(0)}}{\bar{I}_{(0)}}$  se určuje ze střídavého napětí uvažovaného

mezi třemi paralelními vodiči a společným zpětným vedením (například zemí, zemnicím zařízením, nulovým vodičem, zemnicím vodičem, kabelovým pláštěm a kabelovým pancířem). V tomto případě protéká zpětným vedením trojnásobek proudu netočivé složky.

Impedance generátorů (G), síťových transformátorů (T) a elektrárenských bloků (S) se musí vynásobit impedančními korekčními součiniteli  $K_G$ ,  $K_T$  a  $K_S$  nebo  $K_{SO}$  pokud se zkratové proudy počítají pomocí ekvivalentního napětového zdroje v místě zkratu podle normy ČSN EN 60909.

## Sít'ové napáječe

$$Z_{Qt} = \frac{c \cdot U_{nQ}^2}{S_{kQ}^{//}} = \frac{c \cdot U_{nQ}}{\sqrt{3} \cdot I_{kQ}^{//}} \quad (\Omega) \quad (2.18)$$

Je-li zkrat napájen transformátorem ze sítě VN nebo VVN, u které je znám pouze počáteční souměrný zkratový výkon  $S_{kQ}^{//}$  nebo počáteční rázový zkratový proud  $I_{kQ}^{//}$  v bodě připojení napáječe, lze náhradní impedanci  $Z_{Qt}$  vztaženou ke straně transformátoru s nižším napětím jako:

$$Z_{Qt} = \frac{c \cdot U_{nQ}^2}{S_{kQ}^{//}} \cdot \frac{1}{t_r^2} = \frac{c \cdot U_{nQ}}{\sqrt{3} \cdot I_{kQ}^{//}} \cdot \frac{1}{t_r^2} \quad (\Omega) \quad (2.19)$$

$U_{nQ}$  - jmenovité napětí soustavy v bodě připojení napáječe Q,

$S_{kQ}^{//}$  - počáteční souměrný zkratový zdánlivý výkon v bodě připojení napáječe,

$I_{kQ}^{//}$  - počáteční rázový zkratový proud v bodě připojení napáječe Q,

$c$  - součinitel napětí,

$t_r$  - jmenovitý převod transformátoru,

## Transformátory dvouvinut'ové

Sousledné zkratové impedance dvouvinut'ových transformátorů  $\bar{Z}_T = R_T + jX_T$  je možné vypočítat ze jmenovitých údajů transformátoru.

$$Z_T = \frac{u_{kr}}{100} \cdot \frac{U_{rT}^2}{S_{rT}} \quad (\Omega) \quad (2.20)$$

$$R_T = \frac{u_{Rr}}{100} \cdot \frac{U_{rT}^2}{S_{rT}} = \frac{P_{krT}}{3 \cdot I_{rT}^2} \quad (\Omega) \quad (2.21)$$

$$X_T = \sqrt{Z_T^2 - R_T^2} \quad (\Omega) \quad (2.22)$$

$U_{rT}$  - jmenovité napětí transformátoru na straně vyššího nebo nižšího napětí,

$I_{rT}$  - jmenovité proud transformátoru na straně vyššího nebo nižšího napětí,

$S_{rT}$  - jmenovitý zdánlivý výkon transformátoru,

$P_{krT}$  - jmenovité ztráty transformátoru nakrátko,

$u_{kr}$  - jmenovité napětí nakrátko v %,

$u_{Rr}$  - ohmická složka jmenovitého napětí v %,

## Transformátory trojvínut'ové

V případě trojvínut'ových transformátorů lze sousledné zkratové impedance  $\underline{Z}_A$ ,  $\underline{Z}_B$  a  $\underline{Z}_C$  vypočítat pomocí tří zkratových impedancí (vztažených na stranu A transformátoru).

$$\underline{Z}_{AB} = \left( \frac{u_{RrAB}}{100\%} + j \frac{u_{XrAB}}{100\%} \right) \cdot \frac{U_{rTA}^2}{S_{rTAB}} \quad (\text{strana C rozpojena}) \quad (\Omega) \quad (2.23)$$

$$\underline{Z}_{AC} = \left( \frac{u_{RrAC}}{100\%} + j \frac{u_{XrAC}}{100\%} \right) \cdot \frac{U_{rTA}^2}{S_{rTAC}} \quad (\text{strana B rozpojena}) \quad (\Omega) \quad (2.24)$$

$$\underline{Z}_{BC} = \left( \frac{u_{RrBC}}{100\%} + j \frac{u_{XrBC}}{100\%} \right) \cdot \frac{U_{rTA}^2}{S_{rTBC}} \quad (\text{strana A rozpojena}) \quad (\Omega) \quad (2.25)$$

$$\bar{Z}_A = \frac{1}{2} (\bar{Z}_{AB} + \bar{Z}_{AC} - \bar{Z}_{BC}) \quad (\Omega) \quad (2.26)$$

$$\bar{Z}_B = \frac{1}{2} (\bar{Z}_{BC} + \bar{Z}_{AB} - \bar{Z}_{AC}) \quad (\Omega) \quad (2.27)$$

$$\bar{Z}_C = \frac{1}{2} (\bar{Z}_{AC} + \bar{Z}_{BC} - \bar{Z}_{AB}) \quad (\Omega) \quad (2.28)$$

- $U_{rTA}$  - je jmenovité napětí na straně A,
- $S_{rTAB}$  - jmenovitý zdánlivý výkon mezi stranami A a B,
- $S_{rTAC}$  - jmenovitý zdánlivý výkon mezi stranami A a C,
- $S_{rTBC}$  - jmenovitý zdánlivý výkon mezi stranami B a C,
- $u_{RrAB}, u_{XrAB}$  - jsou jmenovité činné a induktivní složky napětí nakrátko uvedeného v procentech mezi stranami A a B,
- $u_{RrAC}, u_{XrAC}$  - jsou jmenovité činné a induktivní složky napětí nakrátko uvedeného v procentech mezi stranami A a C,
- $u_{RrBC}, u_{XrBC}$  - jsou jmenovité činné a induktivní složky napětí nakrátko uvedeného v procentech mezi stranami B a C,

## Reaktory omezující zkratový proud

Sousledné, zpětné a netočivé impedance si jsou rovny za předpokladu geometrické souměrnosti. Omezující reaktory se používají za součást zkratové impedance:

$$Z_R = \frac{u_{kR}}{100\%} \cdot \frac{U_N}{\sqrt{3} \cdot I_{rR}} \quad (\Omega) \quad (2.29)$$

$u_{kR}$  - impedanční napětí reaktoru v %,

$I_{rR}$  - jmenovitý proud reaktoru v A,

$U_N$  - jmenovité napětí reaktoru v kV,

## Synchronní generátory

Pro výpočet počátečních souměrných rázových zkratových proudů v soustavách napájených přímo z generátorů bez blokových transformátorů je třeba v sousledné složkové soustavě použít následující impedanci:

$$\underline{Z}_G = R_G + jX_G \quad (\Omega) \quad (2.30)$$

$$X_G = \frac{x_d'' \cdot U_{nG}^2}{100 \cdot S_{nG}} \quad (\Omega) \quad (2.31)$$

$x_d''$  - rázová reaktance generátoru,

a pro  $R_G$  lze s dostatečnou přesností použít následující hodnoty:

$R_G = 0,05 X_d''$  pro generátory s  $U_{rG} > 1\text{kV}$  a  $S_{rG} \geq 100\text{ MVA}$ ,

$R_G = 0,07 X_d''$  pro generátory s  $U_{rG} > 1\text{kV}$  a  $S_{rG} < 100\text{ MVA}$ ,

$R_G = 0,15 X_d''$  pro generátory s  $U_{rG} \leq 1\text{kV}$ ,

## Synchronní kompenzátory a motory

Při výpočtu počátečního souměrného rázového zkratového proudu  $I_k''$ , nárazového zkratového proudu  $i_p$ , souměrného zkratového vypínacího proudu  $I_b$  a ustáleného zkratového proudu  $I_k$  jsou kompenzátory a motory s napěťovou regulací modelovány stejně jako synchronní generátory.

$$\underline{Z}_{SM} = R_{SM} + jX_{SM} \quad (\Omega) \quad (2.32)$$

$$X_{SM} = \frac{x_d'' \cdot U_{nSM}^2}{100 \cdot S_{nSM}} \quad (\Omega) \quad (2.33)$$

## Asynchronní motory

Příspěvek asynchronních motorů v nízkonapěťové soustavě ke zkratovému proudu  $I_k$  se může zanedbat, jestliže tento příspěvek není větší než 5% počátečního zkratového proudu  $I_k''$ , vypočítaného bez příspěvku těchto motorů.



$$\sum I_{rM} \leq 0,01 I_k'' \quad (\text{kA}) \quad (2.34)$$

$\sum I_{rM}$  - je součet jmenovitých proudů připojených přímo (bez transformátorů) k síti  
kde se vyskytnul zkrat,

$I_k''$  - zkratový proud v místě zkratu bez vlivu motorů,

$$\underline{Z}_{AM} = \frac{U_{nAM}^2}{I_z \frac{P_{nAM}}{\eta_{AM} \cos \varphi_{AM}}} \quad (\Omega; \text{kV, MW, \%}) \quad (2.35)$$

## 3 Problematika napájení průmyslového objektu

### 3.1 Rozvodná zařízení

[4]

Rozvodná zařízení se v průmyslovém rozvodu vyskytují ve všech uvažovaných napěťových hladinách. Jsou umístěny v různých místech rozvodu.

Rozhodující vliv na řešení a vybavení rozvodných zařízení má to, zda jsou provozována.

- a) s trvalou obsluhou,
- b) bez obsluhy, avšak s trvalým dozorem,
- c) bez obsluhy, s dálkovým ovládáním,

V průmyslovém rozvodu se rozvodná zařízení vyskytují buď jako součást elektrických stanic (tj. transformoven, spínacích stanic nebo měníren), nebo jako samostatné části rozvodu. Rozvodná zařízení VN a VVN musí být obvykle doplněna pomocnými zařízeními pro signalizaci, měření, jištění a ovládání (stejnoseměrný proud, výroba a rozvod stlačeného vzduchu). Rozvodná zařízení NN další pomocná zařízení obvykle nepotřebují.

Hlavní funkcí rozvodných zařízení je rozdělovat přivedenou elektrickou energii téhož napětí do několika větví. K tomu účelu jsou vybavena jedním nebo více systémy přípojníc, na které jsou připojeny vývody a napájecí vedení. Přívody a vývody tzv. hlavní odbočky jsou v rozvodném zařízení vybaveny přístroji, které umožňují připojování a odpojování vedení, jejich jištění před účinky přetížení, zkratů, přepětí, podpětí, jejich měření, ovládání a signalizaci stavu hlavních přístrojů.

Podle konstrukce a způsobu montáže se rozvodná zařízení dělí:

- rozvodny - montované a zkoušené na místě užití, nutné stavební úpravy (VN, VVN),
- rozvaděče - přístroje i nosná konstrukce tvoří celek, montáž a zkoušení je ve výrobním závodě (NN, VN),
- rozvodnice - zařízení nn malého rozsahu, např. rozvodná nebo elektroměrová deska apod.

Rozvodná zařízení ZVN a VVN se dosud zřizují jako venkovní rozvodny, u nichž jsou přípojnice a všechny přístroje a spoje v hlavních obvodech odboček umístěny pod širým nebem na ocelových nebo železobetonových konstrukcích a betonových základech. Uspořádání polí rozvodu je silně závislé na zaústění přívodů a vývodů, provedených obvykle venkovními vedeními. V případě zvláště silného znečištění ovzduší v místě budované rozvodny se zřizují rozvodny ZVN a VVN vnitřní se stejným vybavením jako u rozvodu venkovních. Dokonalou ochranou před vlivy okolního prostředí a současně výrazné zmenšení požadavků na prostor a plochu představují zapouzdřené rozvaděče ZVN a VVN s izolací SF<sub>6</sub>.

Rozvodny VN jsou venkovní nebo většinou kobkové. Umožňují realizaci schématu s několika systémy hlavních přípojníc, případně i s pomocnou přípojnící. Používají se ve vstupních (hlavních) transformovnách a spínacích stanicích. V současné době se vyrábějí také tzv. v uzavřeném provedení s pevnou izolací živých částí, s výsuvným vypínačem, složené z několika funkčních celků.

Rozvodná zařízení NN jsou dnes prováděna vesměs jako rozvaděče. Obsahují obvykle v každém poli několik vývodů. Přívody bývají v samostatných polích.

## 3.2 Transformátory

Transformátor je v oboru elektroenergetiky nezastupitelným strojem ve střídavém rozvodu energie. Umožňuje zvyšovat a snižovat napětí pro dálkové přenosy a místní rozvod střídavé energie.

### Hlavní transformátory

Hlavní transformátory jsou buď čistě blokové přímo spojené s alternátorem, nebo spojovací, sloužící pro spojení soustav dvou napětí. Blokového uspořádání se používá na velkých tepelných kondenzačních elektrárnách, jaderných elektrárnách a některých vodních elektrárnách, které předávají celý svůj výkon do elektrizační soustavy. Spojovacích transformátorů se používá v elektrárnách s odběrem na generátorovém napětí, jako jsou teplárny, závodní elektrárny a některé vodní elektrárny.

### **Blokové transformátory**

Výkon blokových transformátorů je dán výkonem alternátoru. Tam, kde je vlastní spotřeba bloku napájena odbočkou ze svorek alternátoru se doporučuje výkon transformátoru volit 93-95% výkonu alternátoru. Počet blokových transformátorů je zpravidla shodný s počtem alternátorů. Zásadně se používají trojfázové transformátory. Při jednofázových lze použít pro bloky velkých výkonů (několik set MVA). Spojení vinutí blokových transformátorů je Yd, přičemž trojúhelník je na straně alternátoru, čímž se vyloučí jednak třetí harmonická napětí na výstupu transformátoru a jednak se zlepši rozdělení zatížení na jednotlivé fáze alternátoru.

### **Spojovací transformátory**

Volba počtu a výkonu transformátorů se provádí na základě porovnání odběru z generátorových přípojníc a instalovaného výkonu elektrárny. Jejich výkon se volí tak, aby přenesly přebytečný nebo nedostávající se výkon na generátorových přípojnících při normálním zatížení alternátorů i přípojníc.

### **Transformátory pro vlastní spotřebu**

Správný chod technologické části každé elektrárny zajišťují pomocná zařízení, která mají nejčastěji elektrický pohon. Všechna tato zařízení tvoří tzv. vlastní spotřebu.

Výkon pracovních zdrojů vlastní spotřeby se určuje v zásadě z příkonu všech spotřebičů, které musí být v chodu při maximálním výkonu hlavního bloku.

U jaderných elektráren musí být výkon pracovního zdroje zvolen tak, aby byl zajištěn normální provoz jednoho elektrického bloku i havarijní odstavení.

Výkon rezervního zdroje vlastní spotřeby pro klasické tepelné elektrárny volíme nejčastěji tak, aby současně zajistil normální chod vlastní spotřeby jednoho elektrárenského bloku, chod naprázdno (doběh) dalšího bloku a pokryla 50% odběru připojeného na společnou rozvodnu. Podle velikosti elektrárny stačí 1 až 2 rezervní transformátory.

### **Sít'ové transformátory**

Velké sít'ové transformátory se vyrábějí s chlazením jádra i vinutí olejem. Drobné sít'ové transformátory s převodem 6kV/NN jsou vzduchové a to pro výkony 800 až 1600 kVA.

Výkony sít'ových transformátorů mohou být i větší než u transformátoru blokových, avšak rozdíly napětí mezi vstupním a výstupním napětím bývají menší.

Uzlové body těchto transformátorů se vyvádějí tak, aby se v síti VVN mohly přímo uzemnit, kdežto v síti VN se musí vyvést se zesílenou izolací pro připojení kompenzačního zařízení.

Další zařízení rozvoden jako synchronní kompenzátory, tlumivky, kondenzátory se připojují vždy na terciální vinutí transformátorů o napětí většinou 10,5 kV. Vlastní spotřebu stanic a rozvoden, která je nesmírně důležitá pro spolehlivý chod, je nutno připojit na nezávislý zdroj.

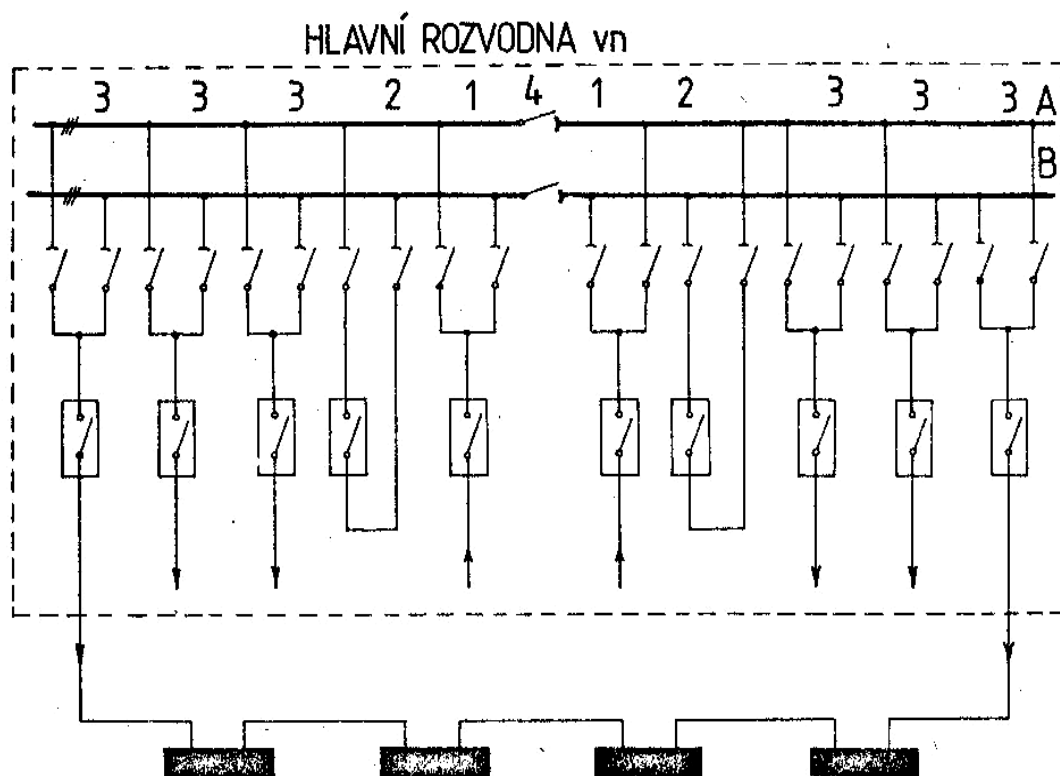
Snížovací transformátory 110 kV/VN – mají odbočky s výzbrojí. Obvykle se nepřipojují k pomocným přípojnícím a příslušné vypínače se nepřemost'ují odpojovači.

Připojení odboček ve velké stanici – na dvojité hlavní a pomocné přípojnice s bleskojistkami a uzemňovacím odpojovačem.

## **3.3 Umístění transformátorů a rozvaděčů**

Malé průmyslové závody napájené transformátory 2x1 MVA, mají pouze jednu transformovnu VN/NN. Středně velké průmyslové závody s příkonem nad 2 MVA mají obvykle hlavní a vstupní transformovnu společnou. Velké průmyslové závody mají vstupní transformovnu umístěnou v nejvhodnějším připojení. Kromě této vstupní transformovny je ještě v závodě několik hlavních rozvoden, umístěných v provozovnách s největším odběrem elektrické energie. Podružné transformovny jsou umístěny co nejblíže spotřebičům.

V závodech s velkou plošnou rozlohou, kde provozy jsou od sebe ve velkých vzdálenostech, umísťujeme rozvodny do podružných transformoven. Podružné transformovny jsou připojeny na okružní napájecí kabelový rozvod VN (obr. 3.1). Z podružných rozvoden může být napájen buď paprskový rozvod, nebo mřížová průmyslová síť.



Obr. 3.1: Kabelový rozvod VN.

1 – přívodní pole, 2 – příčný spínač, 3 – vývodní pole, 4 – podélný spínač přípojníc

### 3.4 Požadavky na elektrické rozvody a zařízení

Při návrhu elektrického zařízení a jeho připojení do elektrizační soustavy je nutné respektovat správné, technické a technicko-hospodářské požadavky a rozhodnutí. Jejich úspěšným splněním lze dosáhnout efektivnosti v zásobování a využívání elektrické energie.

Hlavní hlediska spojená s návrhem elektrického zařízení:

- Bezpečnost osob a zařízení - elektrické zařízení musí být umístěno tak, aby nebylo vystaveno vnějším účinkům, které by způsobovaly jeho poruchy. Svým provozem a vnějšími účinky nesmí ohrožovat osoby, popř. jiná zařízení, ani při mimořádných provozních stavech (zkrat)
- Dodržení velikosti napětí - většina prvků soustavy je navrhována pro trvalý provoz se jmenovitým napětím. Odchyluje-li se od tohoto napětí napětím provozním, mění se zpravidla účinnost zařízení a kromě toho může mít odchylka napětí vliv na životnost.

- Ztráty výkonu - při průchodu proudu jednotlivými prvky vznikají ztráty výkonu. Při malých průřezích vodičů vedení a při materiálech málo vodivých jsou ztráty značné, při nadbytečných průřezích nebude zařízení zcela využito.
- Oteplování provozním proudem - pro každý prvek je s ohledem na jeho konstrukci a umístění stanovena trvalá dovolená teplota. Při jejím překračování může dojít k znehodnocování izolace nebo jiných částí prvku.
- Mechanická odolnost při bezporuchovém provozu - všechny části elektrického zařízení musí být mechanicky pevné, aby snesly namáhání, které se může vyskytnout při používání, a musí být spolehlivě upevněny tak, aby neohrožovaly okolí.
- Odolnost proti účinkům zkratů a velkých nadproudů - zkraty mají vedle dalších účinků tyto dva základní účinky: tepelné a silové. Připouští se zde vyšší tepelné a silové namáhání než v bezporuchovém provozu s ohledem na to, že část postižená poruchou je vypnuta za krátkou dobu, a na malou četnost těchto poruch.
- Obsah vyšších harmonických - v současné době je to velmi závažný problém, spojený především s používáním polovodičových součástek. U zařízení vybavených těmito součástkami se musí uvážit jeho účinky jak u spotřebitele, tak škodlivé zpětné účinky na napájecí soustavu.
- Jistota dodávky a zajištění přizpůsobitelnosti - zařízení se má navrhnout tak, aby výpadky dodávky energie z napájecí soustavy byly co nejméně časté a trvaly možná co nejkratší dobu. To také vyžaduje rychlé odstranění následků poruch pro provoz.
- Trvanlivost - elektrické zařízení musí být přiměřeně trvanlivé, je-li použito v podmínkách, pro které je určeno.
- Uspořádání - elektrické zařízení musí být uspořádáno účelně a přehledně, aby obsluha, kontroly a opravy byly snadné, rychlé a bezpečné a aby případné poruchy postihovaly jen nezbytnou část zařízení.
- Vliv na jiné zařízení - elektrické zařízení má na jiné elektrické obvody nebo na jiná zařízení i neelektrické působit tak, aby to neovlivňovalo jejich správnou funkci.
- Vliv jiných zařízení - elektrická zařízení je třeba umístit tak, aby nebyla vystavena škodlivému působení jiných zařízení.
- Estetický dojem - elektrické zařízení nemá svým zabudováním a umístěním působit nepříznivým estetickým dojmem.
- Unifikace – pro provoz a údržbu je nutné náhradní části. Jejich počet se zmenší, sjednotí-li se vybavení.

Uvedeným požadavkům musí vyhovět elektrické zařízení jako celek a i jeho jednotlivé části. Zpravidla se uváží několik alternativ, které se navzájem porovnávají a vyhodnotí.

### 3.5 Stupeň dodávky elektrické energie

Celkové řešení rozvodné soustavy je ovlivňováno požadavky na stupeň zajištění dodávky elektrické energie. Ovlivňují volbu druhu rozvodných sítí, výkon a počet zdrojů (transformátorů), uspořádání přípojníc a výzbroj odboček rozvodných zařízení a volbu druhu, výkonu a napětí nezávislých proudových zdrojů.

Pro průmyslové závody se rozlišují tři stupně dodávky elektrické energie:

- Dodávky 1. stupně - které musí být zajištěny za všech okolností, protože jejich přerušení by znamenalo ohrožení lidských životů (např. u čerpadel požární vody, u výtahů k evakuaci osob a věcí) nebo způsobilo velké národohospodářské škody znehodnocením výroby, zničením zařízení, zastavením důležitých strojů sloužících k udržování technologického procesu, pokud by tyto ztráty značně převyšovaly náklady na zajištění dodávky 1. stupně. Tyto dodávky musí být zajištěny ze dvou na sobě nezávislých zdrojů o takovém výkonu, aby každý při poruše druhého zajistil plně požadovanou dodávku 1. stupně. Místo druhého (náhradního) napájecího zdroje může být proveden náhradní neelektrický pohon příslušného zařízení (vodní, parní, spalovací apod.).
- Dodávky 2. stupně - mají být pokud možno zajištěny, neboť jejich přerušení a zastavení důležitých strojů může způsobit podstatné omezení nebo zastavení výroby. Ohrožení osob při tom nenastane. Zajišťují se různými způsoby. Obvykle se počet napáječů, jejich průřezy, počet a výkony transformátorů volí tak, aby byla zajištěna vzájemná záloha bez dalších investic.
- Dodávky 3. stupně – nemusí být zjišťovány zvláštními opatřeními.

V určitém závodě mohou být různé požadavky na stupeň dodávky elektrické energie, takže opatření pro zajištění vyšších stupňů se mohou vztahovat pouze na část rozvodného systému.



**Hlavní zásady ke zlepšení spolehlivosti:**

1. Spolehlivost prvků samostatných, tj. transformátorů, vedení, vypínačů, izolací atd.
2. Pečlivá montáž a údržba všech prvků. Především se doporučuje, řadit do série napájecí cesty co nejméně prvků, neboť každý z nich může být zdrojem poruch.
3. Paralelní prvky, vedení apod. zlepšují spolehlivost dodávky.
4. Přenos vyšším napětím je spolehlivější než napětím nižším.
5. V sítích VN zlepšuje spolehlivost dodávky možnost zakruhování napáječů s automatickými záskoky.

**Vyšší spolehlivost lze dosáhnout taky těmito opatřeními:**

1. Zlepšením provozních prostředků, tj. zařízení, vodičů a materiálů
2. Předcházení poruch pravidelnými prohlídkami, preventivními opravami.
3. Omezení následků poruch automatickým řízením a zejména jištěním, které musí být rychlé, selektivní a musí předcházet dlouhotrvajícím poruchám.
4. Možností zkrácení doby oprav a revizí.
5. Možností vhodného časového rozložení revizí a preventivních oprav.
6. Zajištění bezpečné dodávky energie do el. stanice.

## 4 Popis rozvodné sítě průmyslového objektu

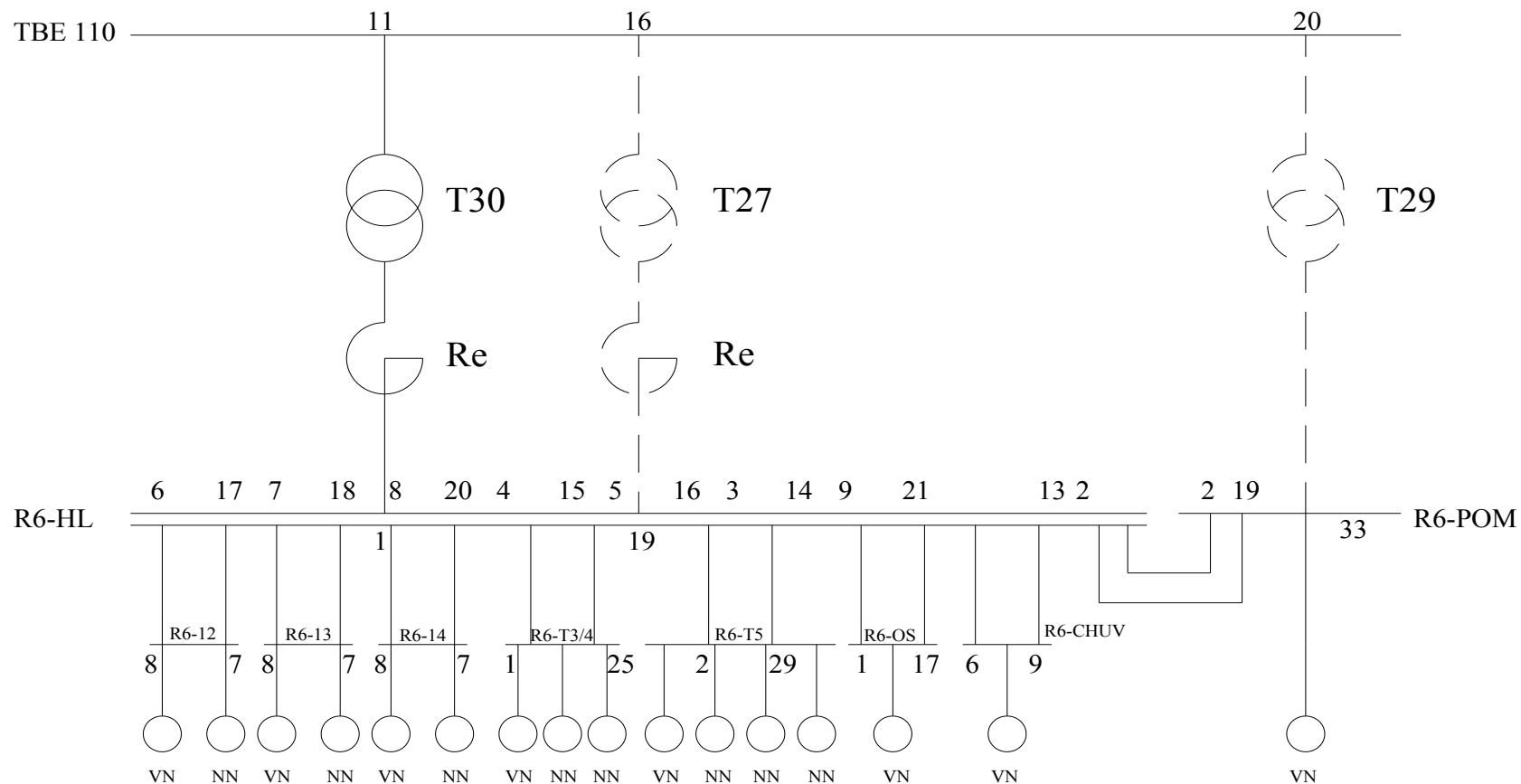
Hlavní částí průmyslového objektu je rozvodna TBE 110 kV, která napájí a transformuje napětí z hladiny 110 kV na hladinu 6 kV rozvodny R6-HL. přes transformátory T30, T27 s reaktory a rozvodnu R6-pomocná přes transformátor T29. Transformátory T27 a T29 slouží jako záloha v případě výpadku či jiné poruchy.

Rozvodna R6-HL. napájí dále rozvodny R6-12, R6-13, R6-14, R6-T3/4, R6-T5, R6-OS, R6-CHUV a jsou spojeny kabelovým vedením. Rozvodny R6-12, R6-13, R6-14, R6-T3/4, R6-T5 obsahují dále motory VN a další transformátory, které transformují napětí z hladiny 6 kV na hladinu 0,4 kV. Na této nižší hladině 0,4 kV je dále 8 rozvoden NN, které obsahují motory na NN. Rozvodny R6-OS a R6-CHUV obsahují pouze motory VN.

Rozvodna R6-pomocná obsahuje taktéž motory VN a transformátory 6/0,4 kV. Rozvodny R6-HL. a R6-pomocná jsou spojeny kabelovým vedením.

Data transformátorů, reaktorů, motorů a kabelových vedení jsou umístěny v příloze.

## Celkové napájení vlastní spotřeby



Obr. 4.1: Celkové schéma vlastní spotřeby.

## 5 Výpočet zkratových poměrů průmyslového objektu

### 5.1 Vstupní data pro výpočet zkratových proudů

Nadřazená soustava 110 kV

Soustava	$S''_{kS \max 3f}$	$S''_{kS \min 3f}$	$X'_{S \max}$	$X'_{S \min}$
	(MVA)	(MVA)	( $\Omega$ )	( $\Omega$ )
110 kV	3317,7	877,2	4,012	13,793

Tab. 5.1: Data rozvodny 110 kV.

$$X'_{S \max} = \frac{c \cdot U_{nS}^2}{S''_{kS \max 3f}} = \frac{1,1 \cdot 110^2}{3317,7} = 4,012 \Omega$$

$$X'_{S \min} = \frac{c \cdot U_{nS}^2}{S''_{kS \min 3f}} = \frac{1 \cdot 110^2}{877,2} = 13,793 \Omega$$

Transformátory

	$U_{nT}$	$S_{nT}$	$u_k$	$I_{nT}$	$X'_T$	$X_T$
	(kV)	(MVA)	(%)	(A)	( $\Omega$ )	( $\Omega$ )
T30	110	50	14,09	262	34,10	0,11
T27	110	16	10,45	84	79,03	0,26

Tab. 5.2: Data transformátorů.

příklad výpočtu pro T30:

$$I_{nT} = \frac{S_{nT}}{\sqrt{3} \cdot U_{nT}} = \frac{50 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 110} = 262 A$$

$$X'_T = \frac{u_k}{100} \cdot \frac{U_{nT}^2}{S_{nT}} = \frac{14,09}{100} \cdot \frac{110^2}{50} = 34,1 \Omega$$

$$X_T = X'_T \cdot \left( \frac{U_v}{U_{nT}} \right)^2 = 34,1 \cdot \left( \frac{6}{110} \right)^2 = 0,11 \Omega$$

**Kabely VN**

Tabulky uvedeny v příloze.

Příklad výpočtu pro K3:

$$R_{K3} = R_{KK3} \cdot l_{K3} = \frac{0,125}{3} \cdot 0,502 = 0,0209 \Omega$$

$$X_{K3} = X_{KK3} \cdot l_{K3} = \frac{0,0879}{3} \cdot 0,502 = 0,0147 \Omega$$

**Kabely NN**

Tabulky uvedeny v příloze.

Příklad výpočtu pro K4:

$$R'_{K4} = R''_{KK4} \cdot l_{K4} = 0,206 \cdot 0,04 = 0,00824 \Omega$$

$$X'_{K4} = X''_{KK4} \cdot l_{K4} = 0,0785 \cdot 0,04 = 0,0031 \Omega$$

Příklad přepočítání reaktancí z hladiny 0,4 na 6 kV:

$$R_{K4} = R_{K4}' \cdot \left( \frac{U_v}{U_{nT}} \right)^2 = 0,00824 \cdot \left( \frac{6}{0,4} \right)^2 = 1,854 \Omega$$

$$X_{K4} = X_{K4}' \cdot \left( \frac{U_v}{U_{nT}} \right)^2 = 0,0031 \cdot \left( \frac{6}{0,4} \right)^2 = 0,698 \Omega$$

**Reaktory**

Reaktor	$U_{nR}$	$I_{nR}$	$u_{kR}$	$X_R$
	(kV)	(A)	(%)	( $\Omega$ )
L27	6	4000	6	0,0546
L30	6	4000	6	0,0546

**Tab. 5.3: Data reaktorů.**

příklad výpočtu pro L27:

$$X_R = \frac{u_{kR}}{100} \cdot \frac{U_{nR}}{\sqrt{3} \cdot I_{nR}} = \frac{6}{100} \cdot \frac{6 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 4000} = 0,0546 \Omega$$

### Motory VN

Tabulky uvedeny v příloze.

Příklad výpočtu pro VTN5 :

$$\underline{Z}_{AM} = \frac{U_{nAM}^2}{I_Z \cdot \frac{P_{nAM}}{\eta_{AM} \cdot \cos \varphi_{AM}}} = \frac{6^2}{5 \cdot \frac{1,85}{0,87}} = 3,386 \Omega$$

$$X_{AM} = 0,948 \cdot 3,386 = 3,21 \Omega$$

### Motory NN

Tabulky uvedeny v příloze.

Příklad výpočtu pro Mlýn 11 :

$$\underline{Z}_{AM} = \frac{U_{nAM}^2}{I_Z \cdot \frac{P_{nAM}}{\eta_{AM} \cdot \cos \varphi_{AM}}} = \frac{0,380^2}{5 \cdot \frac{0,16}{0,84}} = 0,152 \Omega$$

$$X'_{AM} = 0,921 \cdot 0,152 = 0,14 \Omega$$

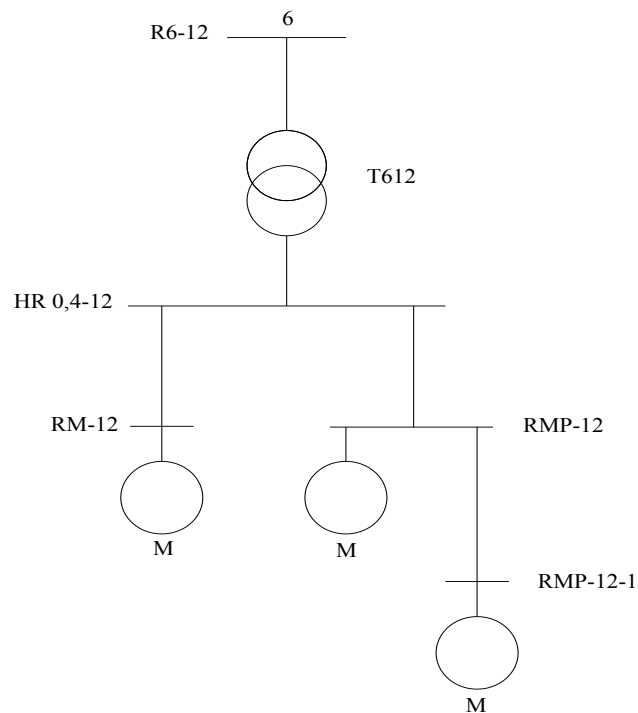
$$\begin{aligned} \frac{1}{\sum X'_{AM}} &= \frac{1}{X_{AM1}} + \frac{1}{X_{AM2}} + \frac{1}{X_{AM3}} + \frac{1}{X_{AM4}} + \frac{1}{X_{AM5}} + \frac{1}{X_{AM6}} + \frac{1}{X_{AM7}} + \frac{1}{X_{AM8}} = \\ &= \frac{1}{3,85} + \frac{1}{5,04} + \frac{1}{66,48} + \frac{1}{54,17} + \frac{1}{97,51} + \frac{1}{97,51} + \frac{1}{97,51} + \frac{1}{97,51} = 0,5325 \Omega \end{aligned}$$

$$X'_{AM} = \frac{1}{\sum X'_{AM}} = \frac{1}{0,5325} = 1,88\Omega$$

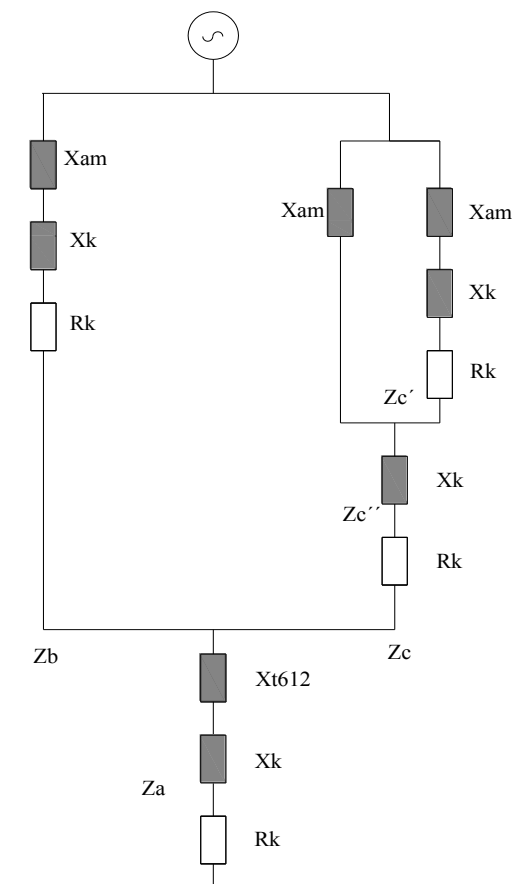
Příklad přepočítání reaktancí z hladiny 0,4 na 6 kV:

$$X_{AM} = X'_{AM} \cdot \left( \frac{U_v}{U_{nT}} \right)^2 = 1,88 \cdot \left( \frac{6}{0,4} \right)^2 = 423\Omega$$

## 5.2 Zkratové příspěvky NN motorů



Obr. 5.1: Schéma rozvodny HR-0,4-12.



Obr. 5.2: Náhradní schéma rozvodny HR-0,4-12.

$$Z_a = R_K + j(X_{T612} + X_K) = 1,5093 + j(0,9 + 2,11) = 1,5093 + j3,01\Omega$$

$$Z_b = R_K + j(X_K + X_{AM}) = 4,5 + j(2,7225 + 24,75) = 4,5 + j27,4725\Omega$$

$$Z_c' = \frac{R_K + j(X_K + X_{AM}) \cdot j(X_{AM})}{R_K + j(X_K + X_{AM}) + j(X_{AM})} = \frac{(3,184 + j328,815) \cdot j(427,5)}{(3,184 + j328,815) + j(427,5)} =$$

$$= 1,107 + j185,86\Omega$$

$$Z_c'' = R_K + jX_K = 4,77 + j2,88\Omega$$

$$Z_c = Z_c' + Z_c'' = 1,107 + j185,86 + 4,77 + j2,88 = 5,877 + j188,74\Omega$$

$$Z_{bc} = \frac{Z_b \cdot Z_c}{Z_b + Z_c} = \frac{(5,877 + j188,74) \cdot (4,5 + j27,4725)}{(5,877 + j188,74) + (4,5 + j27,4725)} = 3,52 + j28,47\Omega$$

$$Z_1 = Z_a + Z_{bc} = 1,5093 + j3,01 + 3,52 + j28,47 = 5,03 + j31,48\Omega$$



Výsledná impedance:

$$|Z_1| = \sqrt{5,03^2 + 31,48^2} = 31,879\Omega$$

Počáteční zkratový proud:

$$I''_{k3} = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot |Z_1|} = \frac{1,1 \cdot 6}{\sqrt{3} \cdot 31,879} = 0,119 \text{ kA}$$

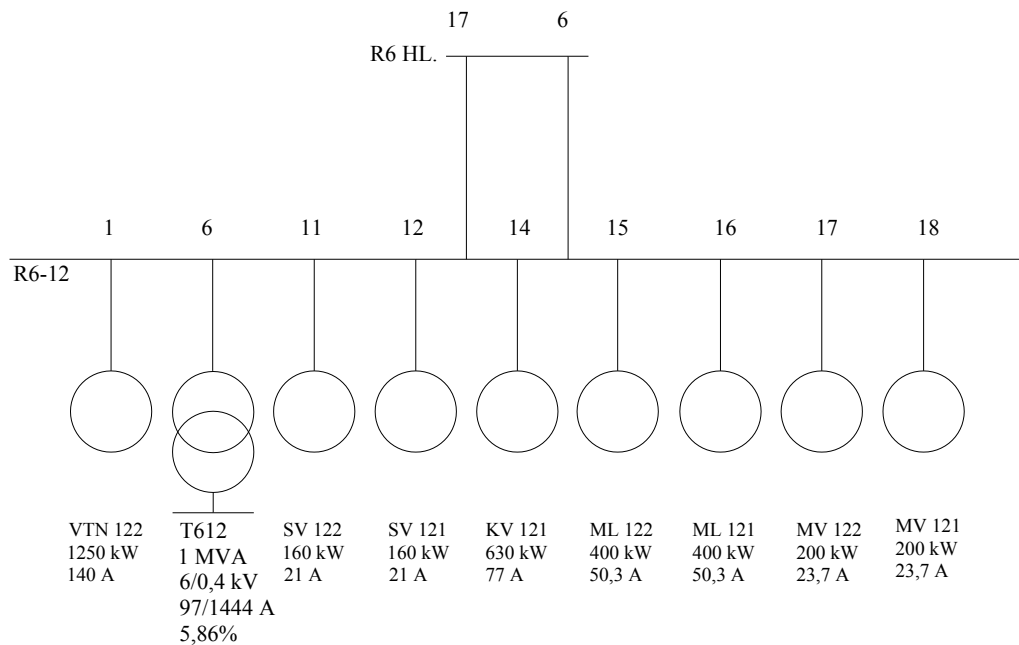
Počáteční zkratový výkon:

$$S''_{k3} = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot I''_{k3} = \sqrt{3} \cdot 6 \cdot 0,119 = 1,242 \text{ MVA}$$

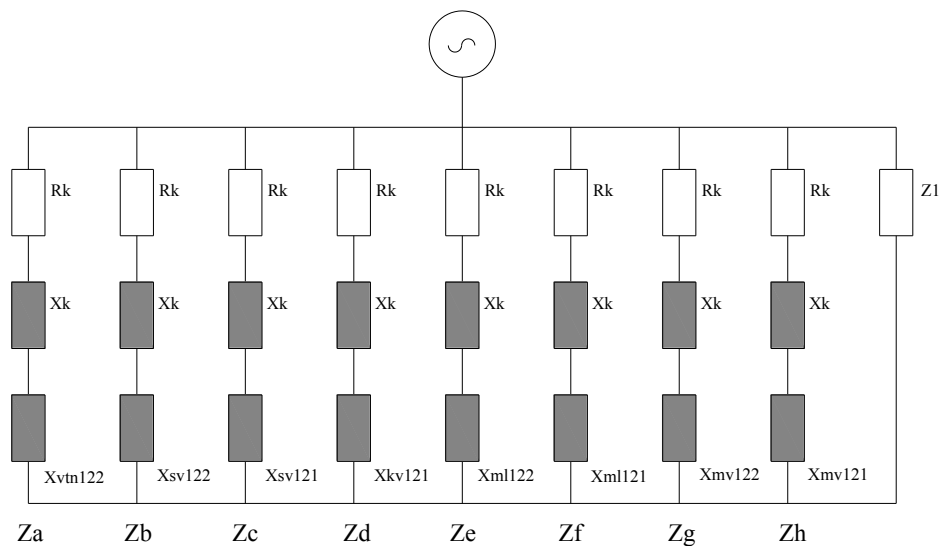
Rozvodny NN	$I''_{k3}$	$S''_{k3}$	$Z$
	(kA)	(MVA)	( $\Omega$ )
HR 0,4-12	0,119	1,242	5,03+j31,48
HR 0,4-13	0,123	1,276	5,03+j30,63
HR 0,4-14	0,118	1,229	5,49+j31,74
HR 0,4-3	0,123	1,278	15,87+j26,5
HR 0,4-5	0,215	2,232	8,37+j15,64
HR 0,4-4	0,179	1,861	8,46+j19,52
HR 0,4-101	0,261	2,7	10,49+j10,24
HR 0,4-102	0,215	2,23	13,86+j11,06

Tab. 5.4: Zkratové příspěvky NN motorů.

### 5.3 Zkratové příspěvky VN motorů



Obr. 5.3: Schéma rozvodny R 6-12.



Obr. 5.4: Náhradní schéma rozvodny R 6-12.

$$Z_a = R_K + j(X_{VTN122} + X_K) = 0,005576 + j(0,0031 + 4,95) = 0,005576 + j4,9531\Omega$$

$$Z_b = R_K + j(X_{SV122} + X_K) = 0,006875 + j(0,0043 + 32,99) = 0,006875 + j32,943\Omega$$

$$Z_c = R_K + j(X_{SV121} + X_K) = 0,0625 + j(0,0394 + 32,99) = 0,0625 + j33,03\Omega$$

$$Z_d = R_K + j(X_{KV121} + X_K) = 0,013625 + j(0,0086 + 9) = 0,013625 + j9,0086\Omega$$

$$Z_e = R_K + j(X_{ML122} + X_K) = 0,008375 + j(0,0053 + 13,77) = 0,008375 + j13,7753\Omega$$

$$Z_f = R_K + j(X_{ML121} + X_K) = 0,0045 + j(0,0028 + 13,77) = 0,0045 + j13,7728\Omega$$

$$Z_g = R_K + j(X_{MV122} + X_K) = 0,02041 + j(0,0096 + 29,23) = 0,02041 + j29,2396\Omega$$

$$Z_h = R_K + j(X_{T612} + X_K) = 0,021 + j(0,0099 + 29,23) = 0,021 + j29,2399\Omega$$

$$Z_1 = 5,03 + j31,48\Omega$$

$$Z = \frac{1}{\frac{1}{Z_a} + \frac{1}{Z_b} + \frac{1}{Z_c} + \frac{1}{Z_d} + \frac{1}{Z_e} + \frac{1}{Z_f} + \frac{1}{Z_g} + \frac{1}{Z_h} + \frac{1}{Z_1}}$$

$$Z = \frac{1}{\frac{1}{0,005576 + j4,9531} + \frac{1}{0,006875 + j32,943} + \frac{1}{0,0625 + j33,03} +$$

$$+ \frac{1}{0,013625 + j9,0086} + \frac{1}{0,008375 + j13,7753} + \frac{1}{0,0045 + j13,7728} +$$

$$\frac{1}{\frac{1}{0,02041 + j29,2396} + \frac{1}{0,021 + j29,2399} + \frac{1}{5,03 + j31,48}} = 0,0166 + j1,75\Omega$$

Výsledná impedance:

$$|Z| = \sqrt{0,0166^2 + 1,75^2} = 1,75\Omega$$

Počáteční zkratový proud:

$$I''_{k3} = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot |Z|} = \frac{1,1 \cdot 6}{\sqrt{3} \cdot 1,75} = 2,177 kA$$

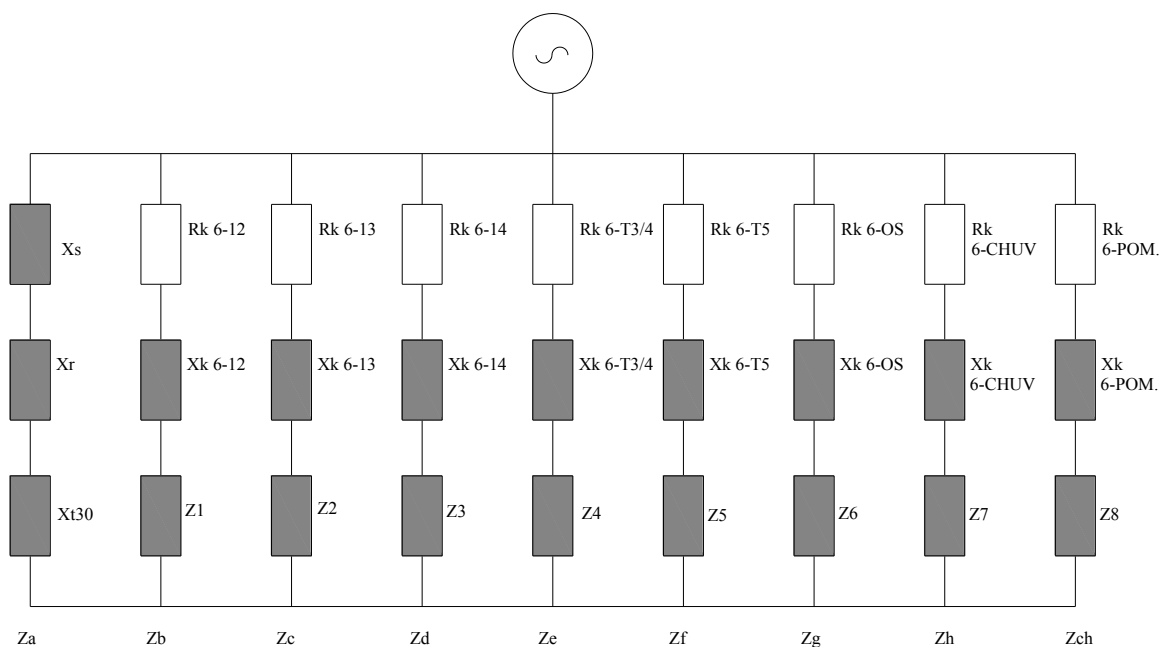
Počáteční zkratový výkon:

$$S''_{k3} = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot I''_{k3} = \sqrt{3} \cdot 6 \cdot 2,177 = 22,62 \text{ MVA}$$

Rozvodny VN	$I''_{k3}$	$S''_{k3}$	$Z$
	(kA)	(MVA)	( $\Omega$ )
R6-12	2,177	22,62	0,0166+j1,75
R6-13	3,393	35,26	0,00772+j1,123
R6-14	1,93	20,52	0,023+j1,973
R6-T3/4	2,06	21,45	0,148+j1,84
R6-T5	2,42	25,15	0,28+j1,55
R6-OS	1,61	16,76	0,0043+j2,362
R6-CHUV	0,269	2,79	0,042+j14,16
R6-POMOCNÁ	5,44	56,57	0,004+j0,7

Tab. 5.5: Zkratové příspěvky VN motorů.

## 5.4 Výpočet maximálních zkratových poměrů na rozvodně R 6-HL.



Obr. 5.5: Schéma maximálních zkratových příspěvků rozvodny R 6-HL.

$$X_{S_{\max}} = X'_{S_{\max}} \cdot \left( \frac{U_v}{U_{ns}} \right)^2 = 4,0118 \cdot \left( \frac{6}{110} \right)^2 = 0,011935 \Omega$$

$$Z_a = j(X_{T30} + X_r + X_s) = j(0,1118 + 0,0545596 + 0,011935) = j0,1783 \Omega$$

$$Z_{K6-12} = \frac{(R_{K6-12/1} + jX_{K6-12/1}) \cdot (R_{K6-12/2} + jX_{K6-12/2})}{(R_{K6-12/1} + jX_{K6-12/1}) + (R_{K6-12/2} + jX_{K6-12/2})} =$$

$$= \frac{(0,003014 + j0,006) \cdot (0,005989 + j0,0094)}{(0,003014 + j0,006) + (0,005989 + j0,0094)} = 0,00613 + j0,01116 \Omega$$

$$Z_b = Z_{K6-12} + Z_1 = 0,00613 + j0,01116 + 0,0166 + j1,75 = 0,02273 + j1,761 \Omega$$

$$Z_{K6-13} = \frac{(R_{K6-13/1} + jX_{K6-13/1}) \cdot (R_{K6-13/2} + jX_{K6-13/2})}{(R_{K6-13/1} + jX_{K6-13/1}) + (R_{K6-13/2} + jX_{K6-13/2})} =$$

$$= \frac{(0,00536 + j0,0106) \cdot (0,005989 + j0,0094)}{(0,00536 + j0,0106) + (0,005989 + j0,0094)} = 0,00286 + j0,005 \Omega$$

$$Z_c = Z_{K6-13} + Z_2 = 0,00286 + j0,005 + 0,00772 + j1,123 = 0,0106 + j1,128 \Omega$$

$$Z_{K6-14} = \frac{(R_{K6-14/1} + jX_{K6-14/1}) \cdot (R_{K6-14/2} + jX_{K6-14/2})}{(R_{K6-14/1} + jX_{K6-14/1}) + (R_{K6-14/2} + jX_{K6-14/2})} =$$

$$= \frac{(0,00438 + j0,0043) \cdot (0,00505 + j0,004)}{(0,00438 + j0,0043) + (0,00505 + j0,004)} = 0,00235 + j0,0021 \Omega$$

$$Z_d = Z_{K6-14} + Z_3 = 0,00235 + j0,0021 + 0,023 + j1,973 = 0,0254 + j1,975 \Omega$$

$$Z_{K6-T3/4} = \frac{(R_{K6-T3/4/1} + jX_{K6-T3/4/1}) \cdot (R_{K6-T3/4/2} + jX_{K6-T3/4/2})}{(R_{K6-T3/4/1} + jX_{K6-T3/4/1}) + (R_{K6-T3/4/2} + jX_{K6-T3/4/2})} =$$

$$= \frac{(0,006 + j0,0155) \cdot (0,0099 + j0,0155)}{(0,006 + j0,0155) + (0,0099 + j0,0155)} = 0,0004 + j0,00603 \Omega$$

$$Z_e = Z_{K6-T3/4} + Z_4 = 0,0004 + j0,00603 + 0,148 + j1,84 = 0,1484 + j1,846\Omega$$

$$\begin{aligned} Z_{K6-T5} &= \frac{(R_{K6-T5/1} + jX_{K6-T5/1}) \cdot (R_{K6-T5/2} + jX_{K6-T5/2})}{(R_{K6-T5/1} + jX_{K6-T5/1}) + (R_{K6-T5/2} + jX_{K6-T5/2})} = \\ &= \frac{(0,006264 + j0,0062) \cdot (0,00462 + j0,0036)}{(0,006264 + j0,0062) + (0,00462 + j0,0036)} = 0,00267 + j0,0023\Omega \end{aligned}$$

$$Z_f = Z_{K6-T5} + Z_5 = 0,00267 + j0,0023 + 0,28 + j1,55 = 0,2827 + j1,5523\Omega$$

$$\begin{aligned} Z_{K6-OS} &= \frac{(R_{K6-OS/1} + jX_{K6-OS/1}) \cdot (R_{K6-OS/2} + jX_{K6-OS/2})}{(R_{K6-OS/1} + jX_{K6-OS/1}) + (R_{K6-OS/2} + jX_{K6-OS/2})} = \\ &= \frac{(0,0209 + j0,0147) \cdot (0,01683 + j0,0149)}{(0,0209 + j0,0147) + (0,01683 + j0,0149)} = 0,00937 + j0,00745\Omega \end{aligned}$$

$$Z_g = Z_{K6-OS} + Z_6 = 0,00937 + j0,00745 + 0,0043 + j2,362 = 0,0137 + j2,3694\Omega$$

$$\begin{aligned} Z_{K6-CHUV} &= \frac{(R_{K6-CHUV/1} + jX_{K6-CHUV/1}) \cdot (R_{K6-CHUV/2} + jX_{K6-CHUV/2})}{(R_{K6-CHUV/1} + jX_{K6-CHUV/1}) + (R_{K6-CHUV/2} + jX_{K6-CHUV/2})} = \\ &= \frac{(0,03153 + j0,029) \cdot (0,03 + j0,0277)}{(0,03153 + j0,029) + (0,03 + j0,0277)} = 0,0154 + j0,0141\Omega \end{aligned}$$

$$Z_h = Z_{K6-CHUV} + Z_7 = 0,0154 + j0,0141 + 0,042 + j14,16 = 0,0574 + j14,1741\Omega$$

$$\begin{aligned} Z_{K6-POM.} &= \frac{(R_{K6-POM./1} + jX_{K6-POM./1}) \cdot (R_{K6-POM./2} + jX_{K6-POM./2})}{(R_{K6-POM./1} + jX_{K6-POM./1}) + (R_{K6-POM./2} + jX_{K6-POM./2})} = \\ &= \frac{(0,0005056 + j0,0021) \cdot (0,001716 + j0,0027)}{(0,0005056 + j0,0021) + (0,001716 + j0,0027)} = 0,00048 + j0,0012\Omega \end{aligned}$$

$$Z_{ch} = Z_{K6-POM.} + Z_8 = 0,00048 + j0,0012 + 0,004 + j0,7 = 0,00448 + j0,7012\Omega$$

$$Z = \frac{1}{\frac{1}{Z_a} + \frac{1}{Z_b} + \frac{1}{Z_c} + \frac{1}{Z_d} + \frac{1}{Z_e} + \frac{1}{Z_f} + \frac{1}{Z_g} + \frac{1}{Z_h} + \frac{1}{Z_{ch}}}$$

$$Z = \frac{1}{\frac{1}{j0,1783} + \frac{1}{0,02273 + j1,761} + \frac{1}{0,0106 + j1,128} + \frac{1}{0,0254 + j1,975}}$$

$$+ \frac{1}{0,1484 + j1,846} + \frac{1}{0,2827 + j1,5523} + \frac{1}{0,0137 + j2,3694}$$

$$\frac{1}{\frac{1}{0,0574 + j14,1741} + \frac{1}{0,00448 + j0,7012}} = 0,00642 + j0,0944\Omega$$

Výsledná impedance:

$$|Z| = \sqrt{0,00642^2 + 0,0944^2} = 0,0946\Omega$$

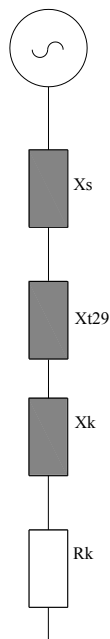
Maximální počáteční zkratový proud:

$$I''_{k3f \max} = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot |Z|} = \frac{1,1 \cdot 6}{\sqrt{3} \cdot 0,0946} = 40,27 kA$$

Maximální počáteční zkratový výkon:

$$S''_{k3f \max} = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot I''_{k3} = \sqrt{3} \cdot 6 \cdot 40,27 = 418,52 MVA$$

## 5.5 Výpočet minimálních zkratových poměrů na rozvodně R 6-HL.



Obr. 5.6: Schéma minimálních zkratových příspěvků rozvodny R 6- HL.

$$X_{S \min} = X'_{S \min} \cdot \left( \frac{U_v}{U_{ns}} \right)^2 = 13,793 \cdot \left( \frac{6}{110} \right)^2 = 0,04103 \Omega$$

$$Z = R_k + j(X_{T29} + X_S + X_k) = 0,000475 + j(0,2592 + 0,04103 + 0,00122) = 0,000475 + j0,30145$$

Výsledná impedance:

$$|Z| = \sqrt{0,000475^2 + 0,30145} = 0,30145 \Omega$$

Minimální počáteční zkratový proud:

$$I''_{k3f \min} = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot |Z|} = \frac{1 \cdot 6}{\sqrt{3} \cdot 0,30145} = 11,5 kA$$

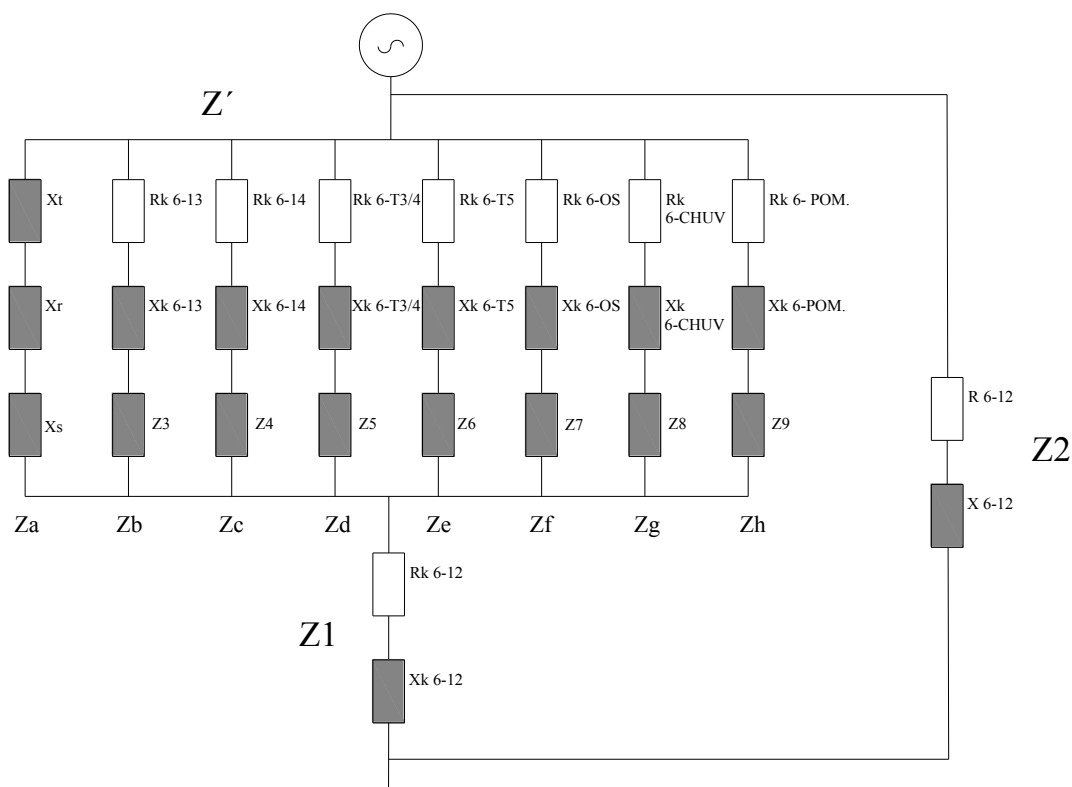
Minimální počáteční zkratový výkon:

$$S''_{k3f \min} = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot I''_{k3} = \sqrt{3} \cdot 6 \cdot 11,5 = 119,51 MVA$$



## 5.6 Výpočet zkratových poměrů rozvodn napájených z rozvodny R6 HL.

### 5.6.1 Rozvodna R 6-12



Obr. 5.7: Schéma maximálních zkratových příspěvků rozvodny R 6-12.

Maximální zkratové poměry:

$$Z' = \frac{1}{\frac{1}{Z_a} + \frac{1}{Z_b} + \frac{1}{Z_c} + \frac{1}{Z_d} + \frac{1}{Z_e} + \frac{1}{Z_f} + \frac{1}{Z_g} + \frac{1}{Z_h}}$$

$$Z' = \frac{1}{\frac{1}{j0,178} + \frac{1}{0,011 + j1,128} + \frac{1}{0,025 + j1,975} + \frac{1}{0,148 + j1,846} + \frac{1}{0,283 + j1,552}}$$

$$Z' = \frac{1}{\frac{1}{0,014 + j2,37} + \frac{1}{0,057 + j14,174} + \frac{1}{0,004 + j0,701}} = 0,00174 + j0,099\Omega$$

$$Z'' = Z_1 + Z' = (0,00613 + j0,0112) + (0,00174 + j0,099) = 0,00187 + j0,1102\Omega$$

$$Z = \frac{Z'' \cdot Z_2}{Z'' + Z_2} = \frac{(0,00187 + j0,1102) \cdot (0,0166 + j1,75)}{(0,00187 + j0,1102) + (0,0166 + j1,75)} = 0,00171 + j0,103\Omega$$

Výsledná impedance:

$$|Z| = \sqrt{0,00171^2 + j0,103^2} = 0,103\Omega$$

Maximální počáteční zkratový proud:

$$I''_{k3f \max} = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot |Z|} = \frac{1,1 \cdot 6}{\sqrt{3} \cdot 0,103} = 36,99 kA$$

Maximální počáteční zkratový výkon:

$$S''_{k3f \max} = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot I''_{k3} = \sqrt{3} \cdot 6 \cdot 36,99 = 384,46 MVA$$

Minimální zkratové poměry:

$$Z = (R_{K6-12} + R_{K-POM.}) + j(X_S + X_{K6-12} + X_{T29} + X_{K-POM.})$$

$$Z = (0,0066 + j0,3123)\Omega$$

Výsledná impedance:

$$|Z| = \sqrt{0,0066^2 + j0,3123^2} = 0,3126\Omega$$

Minimální počáteční zkratový proud:

$$I''_{k3f \min} = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot |Z|} = \frac{1,1 \cdot 6}{\sqrt{3} \cdot 0,3126} = 11,08 kA$$

Minimální počáteční zkratový výkon:

$$S''_{k3f \min} = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot I''_{k3} = \sqrt{3} \cdot 6 \cdot 11,08 = 115,13 MVA$$

### 5.6.2 Zkratové poměry sítě napájené z rozvodny R6 HL.

Rozvodny VN	$I''_{k3f\max}$	$S''_{k3f\max}$	$I''_{k3f\min}$	$S''_{k3f\min}$
	(kA)	(MVA)	(kA)	(MVA)
R6-12	36,99	384,46	11,08	115,13
R6-13	39,25	407,91	11,3	117,46
R6-14	40,15	417,28	11,4	118,62
R6-T3/4	38,49	400	11,27	117,08
R6-T5	39,75	413	11,4	118,51
R6-OS	37,9	394	11,21	116,48
R6-CHUV	35,14	365,2	10,96	113,94
R6-POMOCNÁ	40,24	418,19	11,49	119,43

Tab. 5.6: Max. a min. zkratové příspěvky rozveden VN.

## 5.7 Kontrola kabelů VN na dovolené oteplení při zkratu

Maximální dovolený čas, za který musí být zkrat vypnut je dán vztahem:

$$T_{K\max} \leq \left[ \frac{K \cdot A}{I_k'' \cdot k} \right]^2$$

$$I_{ke} = I_k''^2 \cdot \sqrt{m+n}$$

$$k = \sqrt{m+n}$$

K – koeficient pro výpočet oteplení při zkratu,

A – průřez vodiče,

$I_k''$  - počáteční rázový zkratový proud,

k – koeficient pro výpočet ekvivalentního oteplovacího proudu, podle normy IEC 60909 je k=1,02 (platí pro případ, že uvažují dobu trvání zkratu 0,5sec.),

$T_{K\max}$  - max. doba do vypnutí zkratu,

$m$  – součinitel pro tepelné účinky stejnosměrné složky,

$n$  - součinitel pro tepelné účinky střídavé složky,

$I_{ke}$  - ekvivalentní oteplovací zkratový proud,

Příklad výpočtu pro kabel č.1 u T30:

$$T_{K \max} \leq \left[ \frac{K \cdot A}{I_k'' \cdot k} \right]^2$$

$$T_{K \max} = \left[ \frac{K \cdot A}{I_k'' \cdot k} \right]^2 = \left[ \frac{84 \cdot 1000}{40,27 \cdot 1,02} \right]^2 = 4,18s$$

Maximální doba do vypnutí zkratu je u kabelu č.1 4,8s.

Vypočtené hodnoty uvedeny v příloze.

## 6 Závěr

Cílem této diplomové práce bylo v teoretické části provést rozbor problematiky zkratů, metodiky výpočtu dle normy ČSN EN 60909 a problematiku napájení průmyslových objektů. Tato norma ČSN EN 60909 zavádí zjednodušený postup výpočtu, který se aplikuje i v praxi.

Dále v praktické části byl cílem výpočet maximálních a minimálních zkratových poměrů na rozvodnách VN, NN a kontrola kabelů na dovolené oteplení při zkratu v průmyslovém objektu. Zde jsem uvedl zadané zapojení průmyslového objektu s parametry všech zařízení, které jsem dále využil k výpočtu počátečního souměrného trojfázového zkratového proudu v zadaných místech sítě. Při výpočtu zkratů na jednotlivých rozvodnách byli výsledkem maximální a minimální počáteční zkratový výkon a proud. Hodnoty maximálních počátečních proudů jsem následně využil v poslední části diplomové práce a to ke kontrole kabelů na dovolené oteplení při zkratu.

Největší hodnota maximálního počátečního výkonu a proudu byli spočítány pro rozvodnu R6-Pomocná, kde tyto hodnoty činily  $S''_{k3fmax}=418,19\text{MVA}$  a  $I''_{k3fmax}=40,24\text{kA}$  a pro stejnou rozvodnu hodnoty minimálního počátečního výkonu a proudu  $S''_{k3fmin}=119,43\text{MVA}$  a  $I''_{k3fmin}=11,49\text{kA}$ . Všechny výpočty byly prováděny ve fyzikálních jednotkách.

## Použitá literatura

- [1] STŘEDA, O., BLÁHA, J.: *Posuzování zkratových poměrů v síti*. 1. vyd. Trutnov: Dům kultury ROH, 1988. 146 s. ISBN 59-350-87
- [2] TROJÁNEK, Z., HÁJEK, J., KVASNICA, P.: *Přechodové jevy v elektrizačních soustavách*. 1. vyd. Praha: Nakladatelství technické literatury, 1987. 312 s. ISBN 04-534-87
- [3] PAUZA, J.: *Zkrat v elektrických zařízení*. 1. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury. 1970. 248 s. ISBN 04-509-70
- [4] Hradílek, Z.: *Elektroenergetika II*. Ostrava: VŠB Ostrava, 1993. 168s. ISBN 80-7078-195-5
- [5] Norma ČSN EN 60909-0: *Zkratové proudy v trojfázových střídavých soustavách*.

## Seznam příloh

Příloha č. 1	-	Kontrola kabelů VN na dovolené oteplení při zkratu.
Příloha č. 2	-	Databáze transformátorů.
Příloha č. 3	-	Databáze kabelů VN.
Příloha č. 4	-	Databáze kabelů NN.
Příloha č. 5	-	Databáze motorů VN.
Příloha č. 6	-	Databáze motorů NN.